

**Análisis hidrogeoquímico y de calidad del agua subterránea en el valle de San Nicolás-  
Oriente Antioqueño, para su uso potencial en abastecimiento poblacional.**

**Estudiante**

Vanessa Giraldo Ulloa

Trabajo de Grado para optar al título de Geóloga

**Directora**

Marcela Jaramillo Uribe PhD.

Universidad EAFIT

Facultad de Ciencias

Medellín-2021

## Tabla de Contenido

1	Introducción .....	6
2	Generalidades .....	10
2.1	Objetivo General .....	10
2.2	Objetivos Específicos.....	10
3	Zona de Estudio.....	12
4	Marco Conceptual .....	18
4.1	Calidad de Datos .....	22
4.2	Representación Gráfica de los Datos.....	23
4.3	Calidad del agua subterránea.....	25
5	Metodología .....	28
5.1	Fase de análisis hidrogeoquímico .....	28
5.2	Fase de análisis de la calidad del agua subterránea.....	29
6	Resultados .....	30
7	Discusión.....	39
8	Conclusiones .....	54
9	Bibliografía .....	56

## Listado de Figuras

<b>Figura 1.</b> Índice de Crecimiento Poblacional del VSN. Elaboración propia con base en los datos de CORNARE 2015 y Geoportal DANE 2021.....	14
<b>Figura 2.</b> Representación de diagrama de piper. Fuente: Appelo y Postma, 1996.....	24
<b>Figura 3.</b> Representación de diagrama de Stiff. Fuente: Appelo y Postma, 1996.....	24
<b>Figura 4.</b> Representación diagrama de Stabler. Fuente: Elaboración propia. ....	25
Figura 6. Diagramas de Piper para las muestras de Aljibes. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 7. Diagramas de Piper para las muestras de Pozos. Fuente: Elaboración propia.....	32
<b>Figura 8.</b> Diagramas de Stiff para muestras de Aljibes. Fuente: Elaboración propia .....	35
<b>Figura 9.</b> Diagramas de Stiff para muestras de Pozos. Fuente: Elaboración propia .....	35
<b>Figura 10.</b> Comparación del total de muestras con el Decreto 1594 de 1984. Fuente: Elaboración propia.....	36
<b>Figura 11.</b> Comparación de muestras que cumplieron con el BI con el Decreto 1594 de 1984. Fuente: Elaboración propia. ....	37
<b>Figura 12.</b> Comparación de muestras totales con la resolución 2115 de 2007. Fuente: Elaboración propia.....	38
<b>Figura 13.</b> Comparación de muestras que cumplieron con el BI con la resolución 2115 de 2007. Fuente: Elaboración propia. ....	38
<b>Figura 14.</b> Representación gráfica de la concentración iónica en la muestra A01. Fuente: Elaboración propia. ....	43
<b>Figura 15.</b> Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.....	43

<b>Figura 16.</b> Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.....	44
<b>Figura 17.</b> Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.....	45
<b>Figura 18.</b> Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.....	45
<b>Figura 19.</b> Representación gráfica aumento de Cl. Fuente: Elaboración propia. ....	46
<b>Figura 20.</b> Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.....	47
<b>Figura 21.</b> Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.....	48
<b>Figura 22.</b> Representación gráfica aumento de Mg. Fuente: Elaboración propia. ....	49
<b>Figura 23.</b> Representación gráfica aumento de Mg y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia. ....	49
<b>Figura 24.</b> Representación gráfica aumento de Mg y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia. ....	50
<b>Figura 25.</b> Representación gráfica aumento de Mg. Fuente: Elaboración propia. ....	50
<b>Figura 26.</b> Representación gráfica aumento de SO <sub>4</sub> y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia. ....	51
<b>Figura 27.</b> Representación gráfica aumento de K. Fuente: Elaboración propia.....	52

### **Listado de Mapas**

<b>Mapa 1.</b> Localización de la zona de estudio. Elaboración propia. ....	13
<b>Mapa 2.</b> Geología de la zona de estudio. Elaboración propia, modificado de Universidad EAFIT 2020.....	15
<b>Mapa 3.</b> Unidades Hidrogeológicas y puntos de muestreo CORNARE. Elaboración propia, con base en los datos de Universidad EAFIT 2020. ....	17
<b>Mapa 4.</b> Cobertura de suelo. Fuente: Elaboración propia, con datos de Universidad EAFIT 2020. ....	40
<b>Mapa 5.</b> Líneas de flujo del agua subterránea. Fuente: Elaboración propia, con datos de Universidad EAFIT 2020 .....	41

### **Listado de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> Constituyentes del agua subterránea. Fuente: Universidad EAFIT,2020.....	18
<b>Tabla 2.</b> Error aceptable del BI con base en CE. Fuente: Universidad EAFIT,2020 .....	22
<b>Tabla 3.</b> VMA según Decreto 1594 de 1984. Fuente: Universidad EAFIT, 2020. ....	26
<b>Tabla 4.</b> VMA para las características físicas del agua (artículo 2 de la resolución 2115 de 2007). Fuente: Elaboración propia. ....	26
<b>Tabla 5.</b> VMA para características químicas de sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana diferentes a los plaguicidas (artículo 5 de la resolución 2115 de 2007). Fuente: Elaboración propia. ....	27
<b>Tabla 6.</b> VMA para características químicas de sustancias que tienen implicaciones sobre la salud humana (artículo 6 de la resolución 2115 de 2007). Fuente: Elaboración propia. ....	27

## **Resumen**

El aumento de la población en el oriente antioqueño ha desencadenado una serie de consecuencias negativas en el abastecimiento de servicios públicos principalmente en el recurso hídrico, comprometiendo las fuentes superficiales sobreexplotadas por diversos usos, cambio climático y agentes contaminantes producto de las actividades antrópicas. Con base en estas afirmaciones, se ve en las aguas subterráneas una fuente alterna de abastecimiento, para lo cual es necesario identificar diversos factores; entre ellos la realización de análisis hidrogeoquímicos y de calidad de esta agua, con el fin de determinar si es apta o no para el consumo humano.

En este documento se analizan los factores nombrados anteriormente para el Valle de San Nicolás, con el propósito de identificar los principales contaminantes para el agua subterránea y determinar la suficiencia en la calidad del agua para ser utilizada como fuente de abastecimiento, por medio del cálculo del balance iónico, diagramas de Piper, Stiff y Stabler, y comparaciones con la normatividad colombiana relacionada con las características que debe tener el agua para determinar su uso.

*Palabras clave:* Aguas subterráneas, análisis hidrogeoquímico, calidad del agua, abastecimiento, contaminantes, legislación.

## **Abstract**

The population increase in eastern Antioquia has triggered a series of negative consequences in the supply of public services, particularly the water resource, due to its overexploitation for various uses, climate change and pollutants due to anthropic activities. Based on these statements, groundwater is seen as an alternative source of supply, for which it is necessary to identify various factors, including the performance of hydrogeochemical and quality analysis of this water, to determine whether or not is suitable for human consumption.

This document presents the analyses mentioned above for the San Nicolás Valley, with the purpose of identifying the main contaminants for groundwater and determining the sufficiency in quality to

be used as a source of supply, through the calculation of the ionic balance, Piper, Stiff and Stabler diagrams, and comparisons with the Colombian regulations related to the characteristics that water must have in order to determine its use.

*Key words:* Ground water, hydrogeochemical analysis, water quality, supply, legislation.

## **1 Introducción**

Las aguas subterráneas son cada vez más empleadas como forma de abastecimiento de agua potable para el consumo humano, uso en regiones agrícolas y otras actividades productivas en regiones urbanas y rurales (Schneider & Hare, 1996). Las aguas subterráneas juegan un papel fundamental en el desarrollo de poblaciones humanas y en algunos ecosistemas a nivel mundial. Las reservas de este recurso se hacen cada vez más necesarias en regiones donde la disponibilidad de agua superficial se ve restringida por el cambio climático (Restrepo-Correa et al., 2018).

La creciente demanda de agua como consecuencia del aumento poblacional a nivel nacional genera a las empresas encargadas del abastecimiento del recurso una preocupación debido a las fuentes potenciales para su captación, puesto que cada vez se hacen menores las fuentes de carácter superficial. Estas empresas se han visto en la obligación de explorar las aguas subterráneas considerándolas una fuente alternativa de abastecimiento del recurso.

La región del Valle de San Nicolás (VSN) en el Oriente Antioqueño no es ajena a esta problemática, ya que presenta un aumento en la demanda del recurso, principalmente debido a la expansión urbana en los municipios de El Retiro, Guarne, La Ceja, Marinilla y Rionegro que sirven como “ciudad dormitorio”, es decir, sus residentes trabajan o desempeñan sus actividades diarias en otro municipio y solo pernotan y pasan en estos lugares los fines de semana. Dichos municipios actúan como opciones de veraneo y, por lo tanto, la población aumenta en las noches y los fines de semana incrementando la demanda en los servicios ambientales y servicios públicos, sin contar el aumento en la demanda asociado a la expansión industrial, conflictos de uso del recurso y fraccionamiento de tierras (CORNARE, 2015).

Actualmente, la cuenca del río Negro es la encargada de proveer el recurso hídrico a la población e industrias localizadas en el VSN. Igualmente, mediante trasvase de los embalses de La Fe y Piedras Blancas abastece cerca del 30% del acueducto de Área Metropolitana del Valle de Aburrá. También,

surte de agua al sistema interconectado de los Embalses Peñol – Guatapé, que genera cerca de la tercera parte de la energía hidroeléctrica del país (CORNARE, 2015).

En la cuenca del río Negro están asentados los municipios con mayor número de habitantes de la jurisdicción de CORNARE, así como gran parte del sector productivo e industrial, lo que representa la mayor presión por el recurso hídrico de toda la jurisdicción, esta cuenca aporta el 60% de la carga contaminante total de la región. Según el plan de control a los prestadores de servicios realizado por CORNARE, se encontró que algunos municipios presentan problemas relacionados con disminución del recurso principalmente en épocas del fenómeno del niño, debido a que no se respetan los caudales ambientales, generando consecuencias como la solicitud de aumentar el caudal o de buscar fuentes alternas de abastecimiento para satisfacer la demanda (CORNARE, 2015).

Partiendo de esta problemática se encuentra en las aguas subterráneas una fuente atractiva de agua debido a presentar una menor susceptibilidad a procesos de contaminación y degradación en comparación con las fuentes superficiales. Es necesario conocer su ocurrencia, distribución y principales características hidráulicas, hidrológicas e hidrogeoquímicas para una gestión adecuada y sostenible del recurso es por esto por lo que a nivel nacional se han realizado diversos estudios asociados a esta temática (IDEAM, 2015).

Para el año 2010, el IDEAM identificó en el país 16 Provincias Hidrogeológicas y un área potencial de acuíferos equivalente al 74,5% del territorio nacional, con reservas estimadas del orden de 5.848 km<sup>3</sup> (IDEAM, 2010a). Además, para el Estudio Nacional del Agua (ENA) en el año 2014, se identificaron y caracterizaron 61 sistemas acuíferos que componen dichas provincias (IDEAM, 2015). En el presente estudio, se define el sistema acuífero del Valle de San Nicolas y la Unión con código de identificación SAM 6.7, dentro de la provincia hidrogeológica PM6 (Otros sistemas acuíferos en región Cordillera Occidental-Central), en el cual indican presencia de unidades hidrogeológicas de potencial alto, medio y bajo. En este estudio se exponen, además, los componentes de los modelos hidrogeológicos conceptuales para un sistema acuífero debido a que es un recurso

dinámico dada la continua y periódica actualización de la información de las variables hidrogeológicas de cantidad y calidad, así como estadísticas de extracción y recarga natural e inducida, que son obtenidas a partir de un monitoreo permanente y sistemático en un sistema (IDEAM, 2015).

Entre los estudios realizados para el sistema acuífero del Valle de San Nicolás, se destaca la primera zonificación del recurso hídrico para esta región antioqueña, elaborada en 2 etapas, entre los años 1997 y 2000, mediante un convenio entre la Universidad Nacional de Colombia y CORNARE. Este estudio no presentó ninguna actualización durante 20 años, por lo que para el año 2018, el Grupo de Investigación en Sostenibilidad, Infraestructura y Territorio (SITE) de la universidad EIA, en Convenio con CORNARE, realizó una actualización del modelo hidrológico del sistema, con el cual se obtuvo una versión reciente de las características de este.

Por su parte, la Universidad EAFIT en convenio con Empresas Públicas de Medellín (EPM), en el año 2020, realizó un diagnóstico del estado del conocimiento sobre los sistemas acuíferos de los valles San Nicolás y Aburrá y la actualización del modelo hidrogeológico conceptual (MHC). El documento titulado “Evaluación de la disponibilidad hídrica subterránea y definición de estrategias de abastecimiento en los valles de San Nicolás y Aburrá”, se utilizó como base para la realización de este proyecto.

A pesar de la información aportada por los estudios nombrados anteriormente, se identificó que, en cuanto a características hidrogeoquímicas y de calidad del agua subterránea, aún se observan algunos vacíos principalmente a la hora de profundizar en el análisis de parámetros fundamentales del agua y de su composición química (EAFIT, 2020). La calidad del agua subterránea o superficial es un factor decisivo a la hora de determinar su uso.

Este documento presenta la implementación de un análisis más detallado en el VSN teniendo en cuenta las características físico-químicas y de calidad del agua subterránea y los principales



factores contaminantes, con el objetivo de proveer la información necesaria para la toma de decisiones sobre el uso de dicho recurso. En este documento se expondrán los resultados de dicho análisis con los cuales se podrá corroborar la hidrogeoquímica y la calidad del agua subterránea del sistema acuífero para ser utilizada en esta región antioqueña.

## **2 Generalidades**

Para el desarrollo de este proyecto, es necesario iniciar con los siguientes cuestionamientos simples, pero de gran importancia:

¿Tiene el agua subterránea en el VSN una calidad suficiente para ser utilizada como una fuente alternativa de abastecimiento para la población?

¿Cuáles son las principales fuentes de contaminación del agua subterránea en el VSN?

A partir de estas preguntas, y de lo planteado en la introducción, se expone a continuación la hipótesis que resuelve los planteamientos.

**Hipótesis:** A pesar de las modificaciones en la composición química y la contaminación del agua subterránea del sistema acuífero del VSN debido a las prácticas inadecuadas de actividades económicas y usos del suelo la calidad del agua subterránea es suficiente para usos agrícola, pecuario y doméstico.

Con base en lo anterior, se proponen los siguientes objetivos con los cuales se define el alcance del proyecto y se muestra de manera secuencial los pasos para su correcto desarrollo.

### **2.1 Objetivo General**

Analizar las características físico-químicas del agua subterránea para el sistema acuífero del VSN con el fin de determinar su nivel de calidad y principales fuentes de contaminación, como una primera aproximación para futuros trabajos a realizar.

### **2.2 Objetivos Específicos**

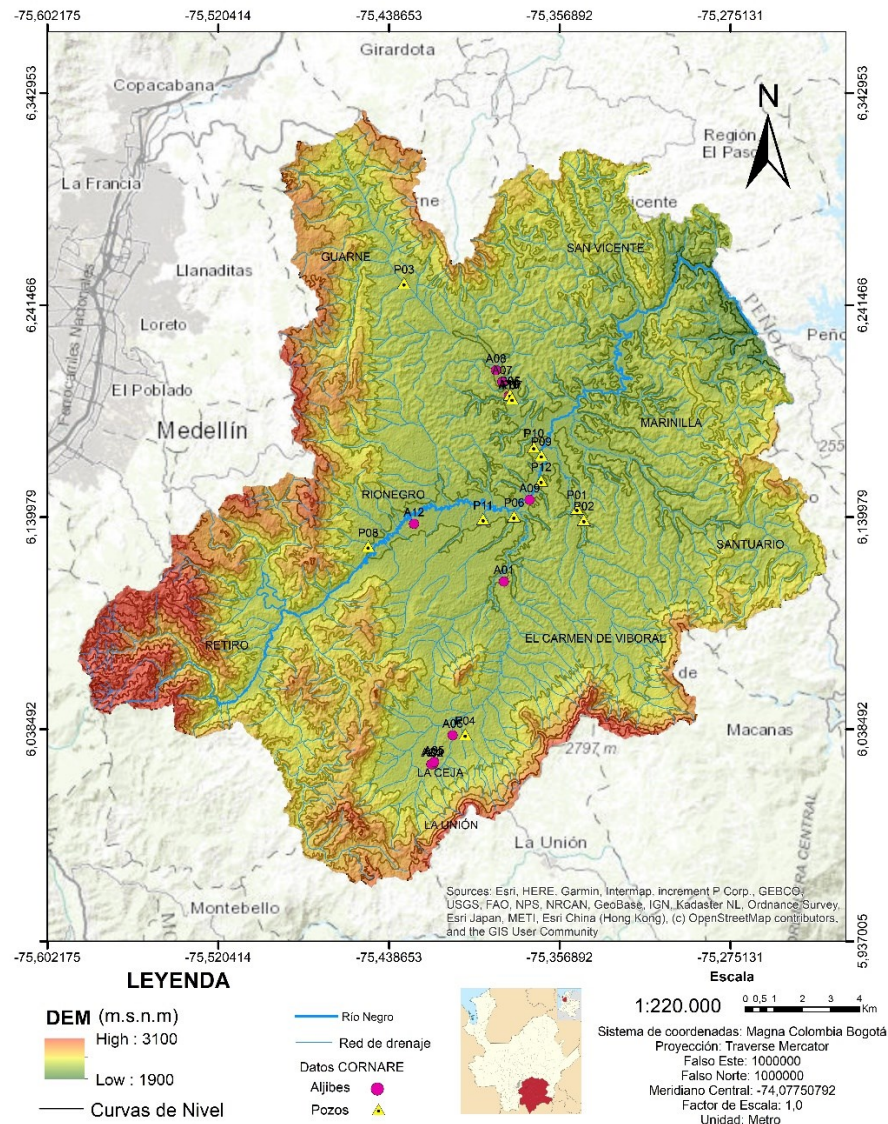
- Realizar una recopilación de los parámetros físicos y químicos del agua subterránea utilizando los datos recopilados en el informe de resultados del monitoreo de oferta y calidad de fuentes subterráneas, realizado por CORNARE, además de la revisión de estudios anteriores.

- Verificar la calidad de la información obtenida, por medio de una revisión de cada uno de los parámetros medidos en el informe de resultados de la corporación autónoma regional de los ríos Negro y Nare (CORNARE) y un balance iónico, identificando que los valores plasmados allí tengan coherencia con respecto a los valores esperados para ese tipo de parámetro en un área con esas características.
- Utilizar el software Diagrammes con el fin de obtener la representación gráfica de los parámetros químicos a través de diagramas de Piper, Stiff y Stabler para determinar la facies hidroquímica e identificar los iones dominantes para cada muestra de agua subterránea.
- Analizar los resultados bajo la normatividad colombiana vigente sobre calidad del agua según el uso.
- Identificar los posibles contaminantes en el agua subterránea del VSN por medio de comparaciones con los usos del suelo en los sitios donde se realizan las campañas de monitoreo.

### **3 Zona de Estudio**

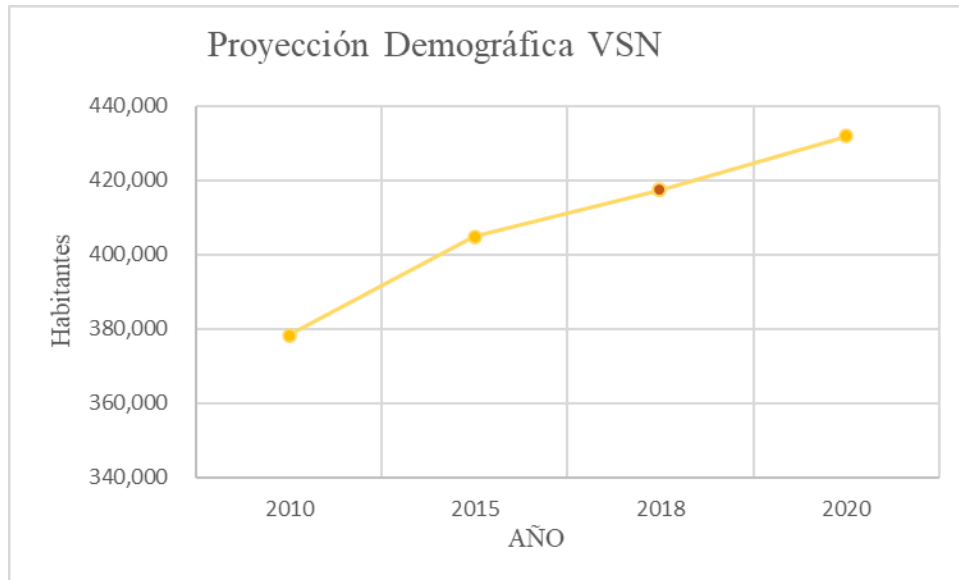
La zona de estudio se encuentra ubicada al oriente del departamento de Antioquia en el VSN, conformado por los municipios de Rionegro, Guarne, Carmen de Viboral, Santuario, Marinilla, El Retiro, La Unión, San Vicente y La Ceja, con una extensión total aproximada de 935 km<sup>2</sup> (EAFIT, 2020). Esta región presenta altitudes entre 1900 y 2600 m.s.n.m. y una temperatura media anual que varía entre los 9°C y 24 °C, predominando un clima templado. Además, el VSN, cuenta con la cuenca del río Negro como su principal proveedora de agua para diversos usos (

Mapa 1).



**Mapa 1.** Localización de la zona de estudio. Elaboración propia.

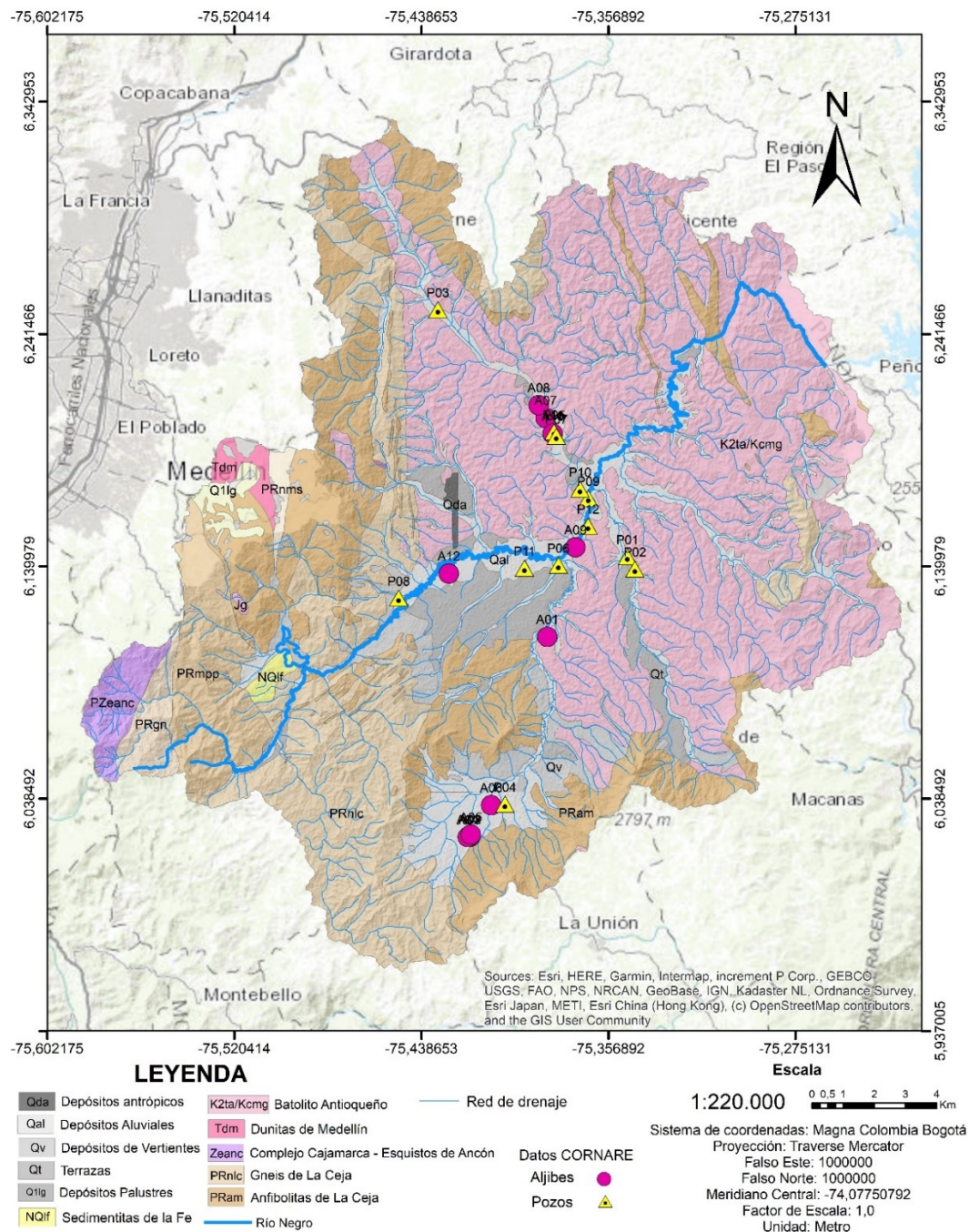
En cuanto a su actividad económica, en el VSN, se destacan la industria manufacturera, el transporte, la floricultura y porcicultura; el sector agropecuario también presenta alto desarrollo (CORNARE, 2016). Con base en los datos del último censo realizado por el DANE en el año 2018 y proyecciones realizadas por CORNARE, se evidencia un crecimiento en la población estimado de 378.343 habitantes en el año 2010 (CORNARE, 2015) a 417.296 habitantes en el 2018 (Figura 1) (Geoportal DANE, 2021).



**Figura 1.** Índice de Crecimiento Poblacional del VSN. Elaboración propia con base en los datos de CORNARE 2015 y Geoportal DANE 2021.

Geológicamente, el VSN está conformado por un basamento de rocas cristalinas fracturadas clasificadas como granitoides del Batolito Antioqueño, que registran edades entre 58 a 100 Ma correspondiente al Cretácico Superior, Serpentinitas, meta sedimentos y anfíbolitas del Grupo Ayurá-Montebello con una edad posiblemente Cretácica (Restrepo et al. 1991). Además, cuenta con un perfil de meteorización en el cual se identifican tres niveles, 1) un suelo residual maduro de limos de baja permeabilidad, 2) una zona saprolítica de limos arenosos y arenas limosas y, 3) una zona de gruss (Mapa 2) (Restrepo-Correa et al. 2018). Además, se reconocen unidades geológicas recientes generadas por la acumulación de depósitos no consolidados de vertiente y depósitos aluviales sobre los suelos residuales y por la presencia de un manto de ceniza volcánica de gran extensión y espesor variable (EAFIT, 2020).





**Mapa 2.** Geología de la zona de estudio. Elaboración propia, modificado de Universidad EAFIT 2020.

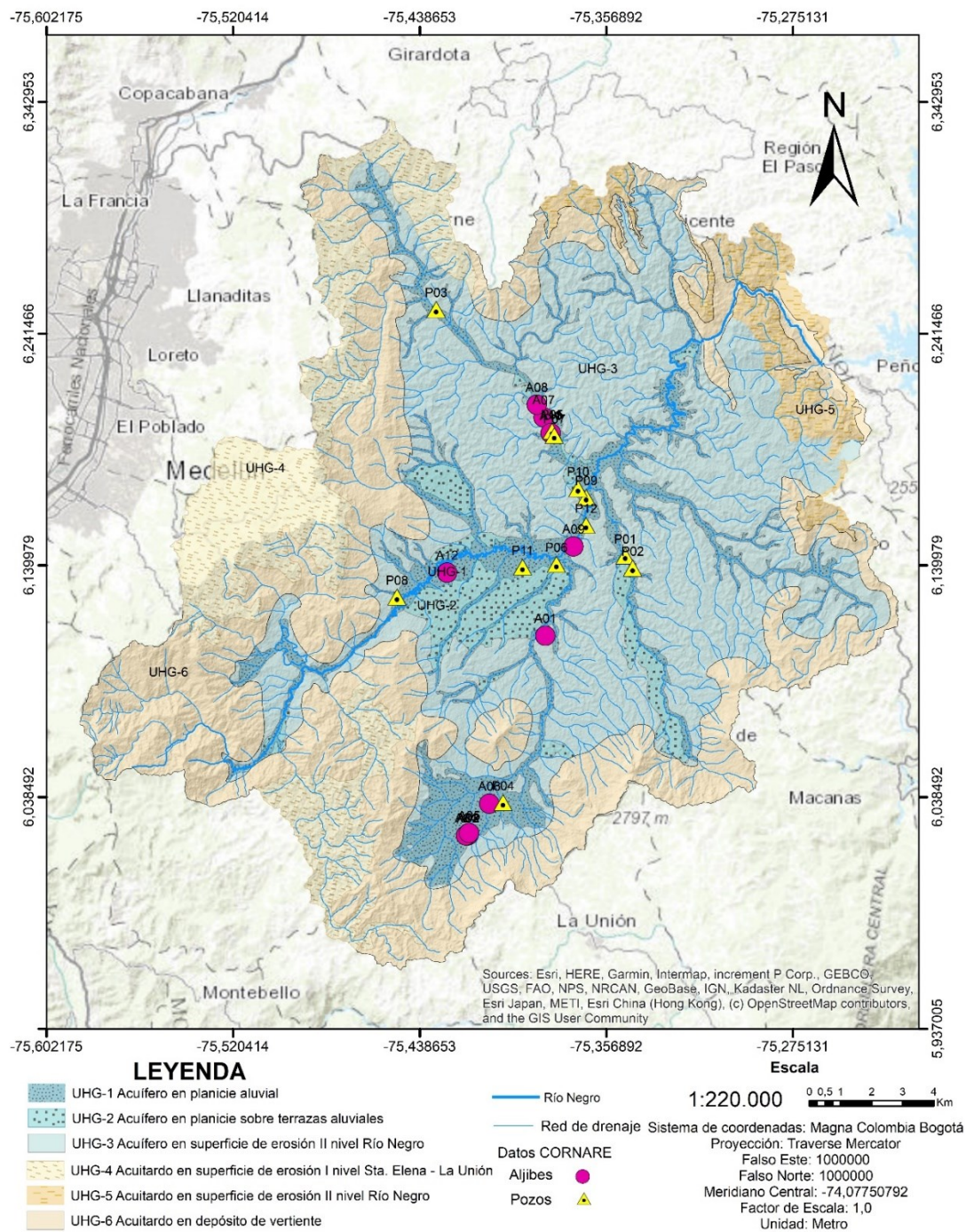
En cuanto a la geomorfología, esta región está ubicada en la superficie de erosión SII que corresponde al Altiplano de Rionegro propuesta por Page y James en 1981. Se define como una penillanura con colinas saprolítica que destacan sobre un conjunto de terrazas y las vegas aluviales del río Negro y las quebradas La Honda, La Pereira, La Marinilla y La Cimarrona.

A partir de la actualización del modelo hidrogeológico conceptual (MHC) para el VSN por Restrepo-Correa et al. (2018), se definieron tres unidades hidrogeológicas de tipo acuífero, con potenciales hidrogeológicos entre bajo y alto, ubicadas en terrazas y planicies aluviales, UHG 1 - planicie aluvial (de 95.61 km<sup>2</sup> de extensión) que corresponde con la UHG de mayor potencial. La UHG 2 - terraza aluvial (de 37.02 km<sup>2</sup> de extensión) y, por último y con menor potencial, la UHG 3 - superficie de erosión II de río Negro y que consta de una extensión de 326.45 km<sup>2</sup>.

Dichas unidades se definieron a través de la integración de datos geofísicos y la utilización del modelo de elevación digital (DEM) de la zona. En la actualización del MHC realizada por la universidad EAFIT (2020), se definieron tres nuevas unidades hidrogeológicas, todas ellas acuitardos, los cuales se caracterizan por presentar un flujo de agua subterránea de forma lenta, lo que les confiere un potencial hidrogeológico bajo en comparación con las unidades acuíferas; UHG 4 - acuitardo en superficie de erosión I nivel Santa Elena – La Unión, UHG 5 - acuitardo en superficie de erosión II nivel Rionegro, UHG 6 - acuitardo en depósitos de vertiente (Mapa 3).

Además, se calculó en este estudio la reserva potencial del recurso hídrico para las tres unidades con mayor potencial hidrogeológico, que arrojó valores promedio de 0,99 km<sup>3</sup> en un escenario promedio, es decir, en condiciones en las que el espesor del acuífero no está ni saturado ni seco y de 1,69 km<sup>3</sup> en un escenario máximo, es decir, cuando el espesor se encuentra saturado. El estudio de EAFIT (2020) también presenta una estimación de la recarga con un valor promedio de 645,93 mm/año.





**Mapa 3.** Unidades Hidrogeológicas y puntos de muestreo CORNARE. Elaboración propia, con base en los datos de Universidad EAFIT 2020.

## 4 Marco Conceptual

El agua subterránea es un recurso natural que constituye la principal reserva de agua dulce del planeta (30%) (Schneider y Hare, 1996), en la que su composición química, es el resultado neto de un conjunto de reacciones químicas entre el agua y el terreno en el que circula; incluyendo la mineralogía, gases y materia orgánica presentes (Restrepo-Correa et al. 2018) . El agua subterránea comprende una gran variedad de constituyentes y propiedades, los cuales fueron clasificados por Freeze y Cherry (1979), según su frecuencia de aparición y valor de concentración decrecientes como muestra la Tabla 1

**Tabla 1.** Constituyentes del agua subterránea. Fuente: Universidad EAFIT,2020

Constituyentes mayoritarios o fundamentales		
Aniones	Cationes	Otros
$(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{NH}_4^+$	$\text{CO}_2$ , $\text{SiO}_2$ , $\text{O}_2$
Constituyentes minoritarios o secundarios		
Aniones	Cationes	Otros
F, S, $\text{Br}^-$ , $\text{NO}_4^{2-}$ , $\text{PO}_4^{2-}$	Mn, Fe, Li, Sr, Zn.	-
Constituyentes Traza		
Aniones	Cationes	Otros
-	Al, Ti, Co, Cu, Pb, Ni, Cr	-

Con el fin de definir los parámetros utilizados para el análisis hidrogeoquímico, se exponen a continuación algunas características de los constituyentes nombrados en la tabla 1, la forma en la cual se disuelven estos iones en el agua subterránea, su asociación y reacciones que se generan al interactuar con algunos parámetros físicos, así como algunas consecuencias debido a su consumo.

**Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ):** La presencia de  $\text{Ca}^{2+}$  está asociada a la dureza del agua y a las incrustaciones en los pozos. suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas. sedimentarias y metamórficas (IGME, 1985).

**Hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ):** El hierro es un elemento que no presenta riesgos para la salud en la medida que su ingesta sea aproximadamente 0,4-1 mg/kg de peso corporal al día; sin embargo, una ingesta mayor a

200-250 mg/kg de peso corporal, puede ser letal (Organización Mundial de la Salud, 2003). Presenta generalmente efectos estéticos, produce un sabor desagradable, manchas en la ropa y en la comida; además, en aguas duras puede originar incrustaciones (Johnson, 1975).

**Magnesio ( $Mg^{2+}$ ):** Contribuye también a la dureza del agua y con pH alto da origen a  $Mg(OH)_2$  que se encuentra en los pozos (IGME, 1985).

**Potasio ( $K^+$ ):** Proviene de la meteorización de feldespatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas. En aguas subterráneas el contenido  $K^+$  no suele sobrepasar 10 mg/l, aunque en casos excepcionales pueden alcanzarse 100,000 mg/l (salmueras). Cantidades de  $K^+$  por encima de 10 mg/l pueden, en ocasiones, ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales (IGME, 1985).

**Cloruros ( $Cl^-$ ):** Las fuentes naturales de cloruros en el agua subterránea provienen de erosión de rocas, deposición atmosférica y la precipitación. Otras fuentes de  $Cl^-$  pueden ser por uso de fertilizantes o detergentes (IGME, 1985).

**Sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ):** La disolución de yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) y anhidrita ( $CaSO_4$ ) y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno, representa frecuentemente el aporte cuantitativo más relevante de este ion a las aguas subterráneas. La mayoría de las aguas subterráneas sulfurosas presentan contenidos apreciables de  $HS^-$  o  $H_2S$  que incluso a concentraciones muy bajas confieren al agua el típico olor a huevos podridos. En aguas dulces la concentración normal de  $SO_4^{2-}$  puede variar entre 2 y 150 mg/l. En aguas salinas, asociado al  $Ca^{2+}$ , puede llegar a 5.000 mg/l: asociado con  $Mg^{2+}$  y  $Na^+$  (IGME, 1985).

**Nitratos ( $NO_3^-$ ):** Altas concentraciones de nitrato en aguas de pozos pueden deberse a una infiltración de aguas contaminadas con desperdicios animales y fertilizantes a base de nitrógeno. Concentraciones de nitrato mayores de 45 mg/l, pueden tener efectos tóxicos sobre los niños (IGME, 1985).

**Nitritos ( $NO_2^-$ ):** La presencia de nitritos en el agua, está directamente relacionada con actividad biológica, como desechos de ganado, marraneras, gallineros, aguas negras, basureros. El principal

efecto biológico del nitrito es la formación de metahemoglobina en la sangre, limitando el transporte de oxígeno en el cuerpo (Johnson, 1975).

**Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ):** Procede fundamentalmente de la zona edáfica, (respiración de organismos y descomposición de la materia orgánica) en la que alcanza presiones parciales del orden de  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  bar. Este se disuelve en el agua en función de su presión parcial ( $\text{PCO}_2$ ), una parte permanece en disolución en forma de gas mientras otra reacciona con el agua para dar ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) que se disocia parcialmente para dar iones carbonato y bicarbonato. La concentración de  $\text{HCO}_3^-$  suele variar entre 50 y 400 mg/l, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/l (IGME, 1985).

**Sodio ( $\text{Na}^+$ ):** Es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como  $\text{NaCl}$ . Las sales de Na son altamente solubles y tienden a permanecer en solución, ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación. Su presencia en cantidades elevadas es muy perjudicial para la agricultura ya que tiende a impermeabilizar los suelos (IGME, 1985).

### **Propiedades físico-químicas**

Como consecuencia de la composición química y las acciones naturales externas, las aguas subterráneas presentan una serie de propiedades físico-químicas y microbiológicas como temperatura, pH, conductividad eléctrica, dureza total, coliformes totales, e. coli, color verdadero, turbiedad. A continuación, se definen algunas de ellas (IGME, 1985).

**Temperatura:** Se define como el potencial calórico referido a cierto origen, sus unidades de medida son grados  $^{\circ}\text{C}$  o  $^{\circ}\text{F}$ , a pesar de no presentar variaciones considerables, es un parámetro importante en lo que se refiere al control del quimismo de las aguas. en particular cuando entre áreas diferentes del acuífero existen notables diferencias de temperatura que pueden influir en la solubilidad de determinadas sustancias como  $\text{CaCO}_3$  (IGME, 1985).

**Conductividad eléctrica (CE):** Como consecuencia de su contenido iónico, el agua se hace conductora de la electricidad. A medida que la concentración iónica aumenta, aumenta también hasta cierto límite la conductividad (CE) o capacidad de un agua para conducir la corriente eléctrica. La unidad de medida de conductividad es el  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (micro siemens/cm) o  $\mu\text{mho}/\text{cm}$  (micromho/cm), ambas equivalentes (IGME, 1985).

**Alcalinidad:** La alcalinidad de un agua determina su capacidad para neutralizar ácidos, en la mayoría de las aguas naturales la alcalinidad está producida prácticamente por los iones carbonato y bicarbonato, aunque, en ocasiones. Otros ácidos débiles como el silícico, fosfórico, bórico y ácidos orgánicos pueden contribuir de forma notable al desarrollo de esta propiedad (IGME, 1985).

**pH:** El valor del pH define la acidez del agua, siendo para aguas neutras  $\text{pH} = 7$ , para aguas ácidas  $\text{pH} < 7$  y para aguas básicas  $\text{pH} > 7$ . El pH aumenta con el aumento de temperatura hasta en un 8%, por lo que debe referirse a la temperatura de medida in situ. Por regla general el pH de las aguas naturales se mantiene entre 6,5 y 8,0 aunque excepcionalmente puede variar entre 3 y 11. Este parámetro juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas naturales (equilibrio carbonatado, procesos redox, etc.); además, es fácilmente alterable por lo que su determinación debe hacerse en el momento de la toma de muestra (IGME, 1985).

**Dureza:** Mide la capacidad de ésta para consumir jabón o producir incrustaciones, actualmente se define en términos de contenido en Ca y Mg; en aguas subterráneas naturales su concentración varía generalmente entre 10 y 300 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , pudiendo llegar a 2000 mg/l o más (IGME, 1985).

La utilidad de estos constituyentes y propiedades físico-químicas, se ve reflejada al momento de realizar análisis de calidad del agua, en los que básicamente se busca conocer sus concentraciones para así definir el tipo de uso y tratamiento que se le debe dar al agua subterránea; algunos de los procesamientos para dicho análisis, se definen a continuación

#### 4.1 Calidad de Datos

**Balance iónico (BI):** Supone que la suma de cationes mayoritarios ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) es igual a la suma de aniones mayoritarios ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ), esto para estimar la precisión del análisis químico a realizar; teniendo como cero el valor de un balance perfecto entre las especies (Appelo y Postma, 1996).

Para el resultado de este cálculo se admite un porcentaje de error siguiendo las consideraciones de cuatro autores, Appelo y Postma y Custodio y Llamas. Según Appelo y Postma (1996), diferencias de alrededor del 2% en el BI son inevitables en cualquier laboratorio, e incluso errores mayores pueden ser aceptados, siempre y cuando no superen el 5%, en cuyo caso, el muestreo y los métodos analíticos deberán ser examinados. Custodio y Llamas (2001; en IDEAM, 2013), aseguran que los valores admisibles para el error del balance iónico dependen de la CE que la muestra registre, tal como se muestra en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Error aceptable del BI con base en CE. Fuente: Universidad EAFIT, 2020

Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	50	200	500	2000	>2000
Error aceptable (%)	$\pm 30$	$\pm 10$	$\pm 8$	$\pm 4$	$\pm 4$

La ecuación del balance iónico se representa así:

$$\text{Error } [\%] = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} \times 100$$

Para las sumatorias de aniones y cationes mayoritarios presentadas en la ecuación anterior, se hace necesario efectuar un cambio de unidades mg/L a meq/L. Esta conversión se realiza multiplicando la concentración de cada ion por su estado de oxidación y dividiéndolo por su peso atómico como se muestra en el siguiente ejemplo:

$$\text{SO}_4^{2-} = 5,19 \text{ mg/L} \longrightarrow (5,19 \times 2) / 96 = 0,108125 \text{ meq/L}$$

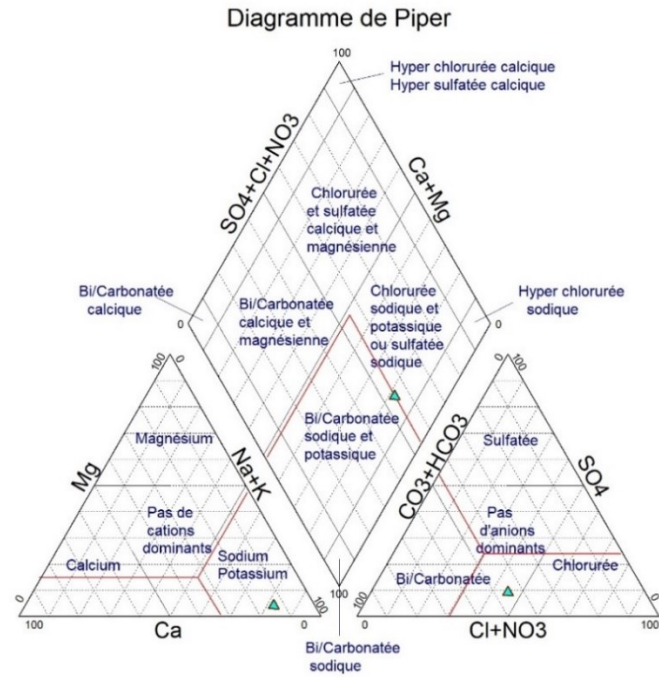
Peso atómico = 96; Estado de oxidación = 2

## 4.2 Representación Gráfica de los Datos

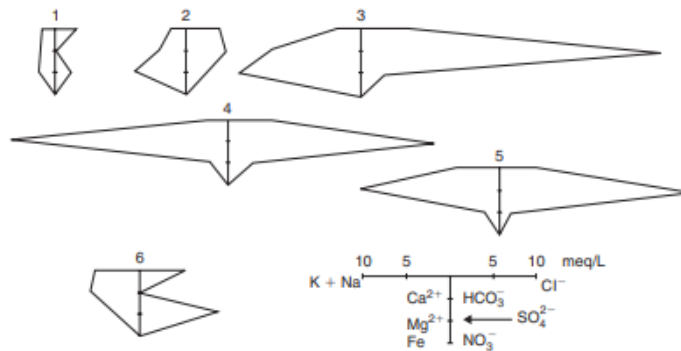
Para la representación gráfica de los datos analizados se utilizó el software Diagrammes, de uso libre creado por la Universidad de Avignon, el cual permite realizar gráficos de Piper, Stabler, Schoeller-Berkalov, Stiff, Binarios Riverside/Wilcox, Korjinski, simulación de pH, cálculos estadísticos y modelación usando el algoritmo Phreeq. Para este proyecto se utilizó la versión 6.73 tomada de: <http://www.lha.univ-avignon.fr/>, con el fin de obtener gráficos de Piper, Stiff y Stabler.

**Diagramas de Piper:** Es un esquema trilineal que permite observar la composición iónica de múltiples muestras e identificar la composición geoquímica de las aguas, así como algunos procesos que pueden controlar o alterar dicha composición. Consiste en dos triángulos inferiores que describen las composiciones relativas de cationes (triángulo izquierdo) y aniones (triángulo derecho) y un diamante en la parte superior que combina la composición de cationes y aniones mayoritarios. Finalmente, la composición relativa de la muestra queda indicada por un punto en el diamante, el cual permite clasificarla con base en su facies hidroquímica, según el o los iones dominantes (Figura 2) (Appelo y Postma, 1996).

**Diagrama de Stiff:** Es un polígono creado a partir de tres o cuatro ejes horizontales que se extienden a cada lado desde un eje vertical de cero, en cada uno, la concentración de un catión se representa a la izquierda y la de un anión a la derecha, ambas en meq/l. Este diagrama permite una visualización rápida para comparar el agua en diferentes lugares, ya que la forma del polígono está mostrando un tipo de agua determinado, dependiendo de la concentración de los iones dominantes (Figura 3) (Appelo y Postma, 1996).



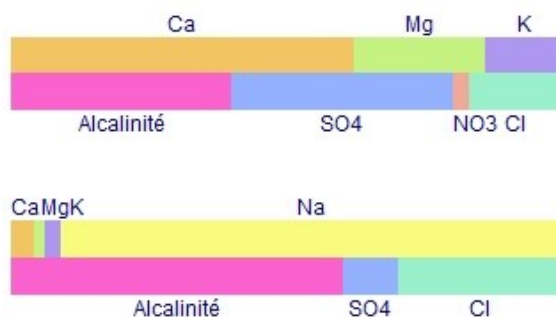
**Figura 2.** Representación de diagrama de piper. Fuente: Appelo y Postma, 1996.



**Figura 3.** Representación de diagrama de Stiff. Fuente: Appelo y Postma, 1996.

**Diagrama de Stabler:** Este tipo de diagramas se representan en bloque, cuya función es similar a la de los diagramas de Stiff, ya que indican el contenido de iones mayoritarios en una muestra de agua (Figura 4).





**Figura 4.** Representación diagrama de Stabler. Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Calidad del agua subterránea

A partir de un análisis hidrogeoquímico, realizado con base en los conceptos expuestos anteriormente, se puede realizar un análisis de calidad del agua, la cual se define en función del uso y se entiende como el conjunto de características químicas, físicas y biológicas del elemento, que le hacen apto para distintos usos como: consumo humano, agricultura y ganadería, industria, generación de energía, navegación, recreación o mantenimiento de las funciones de los ecosistemas (Rodrigo et al., 2018).

Para el análisis de calidad del agua subterránea, se lleva a cabo una comparación entre los valores obtenidos en cada muestra con los valores máximos admisibles por la legislación colombiana para su uso, la cual se presenta a continuación:

**Decreto 1594 de 1984:** En el cual se establecen los valores máximos admisibles (VMA) para parámetros físico-químicos y microbiológicos en agua para consumo humano y doméstico, cuya potabilización requiere tratamiento convencional o sólo desinfección, según los artículos 38 y 39, respectivamente, para uso agrícola en el artículo 40 y pecuario en el artículo 41. Los parámetros presentados en la Tabla 3 fueron los utilizados para los análisis de las muestras.

**Tabla 3.** VMA según Decreto 1594 de 1984. Fuente: Universidad EAFIT, 2020.

Referencia	Art. 38 Tratamiento convencional	Art. 39 Solo desinfección	Art. 40 Uso agrícola	Art. 41 Uso pecuario
Parámetros				
Cadmio (mg/L)	0,01	0,01	0,01	0,05
Cobre (mg/L)	1,0	2,0	2,0	0,5
Plomo (mg/L)	0,05	0,05	*	0,1
Mercurio (mg/L)	0,002	0,002	*	*
Nitritos (mg/L)	1,0	1,0	*	10,0
Nitratos (mg/L)	10,0	10,0	*	*
Nitritos + Nitratos (mg/L)	*	*	*	100,0
Zinc (mg/L)	15,0	15,0	2,0	25,0
Coliformes totales (UFC/100 mL)	20,000	1,000		*
Cloruros (mg/L)	250,0	250,0	*	*
Sulfatos (mg/L)	400,0	400,0	*	*
Turbiedad (UNT) **	*	10		*
pH (U de pH)	5,0 – 9,0	6,5 – 8,5	4,0 – 9,0	*
(*) No hay valor máximo admisible para este parámetro.				
(**) Para el parámetro de Turbiedad, a pesar de que los VMA se presentan en Unidades Jackson de Turbiedad (UJT) según el decreto 1594 de 1984 y las muestras obtenidas se presentan en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT), se considerará el VMA para Turbiedad para el artículo 39 como 10 UNT debido a que, numéricamente, las medidas son cercanas y los márgenes de error son bajos.				

**Resolución 2115 de 2007:** Por medio de la cual, se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Para efectos de este proyecto, se tomarán los VMA en el artículo 2 (Tabla 4), artículo 5 (Tabla 5) y artículo 6 (Tabla 6), debido a que se exponen los parámetros que se utilizan para este proyecto. Estos artículos se relacionan directamente con las características físicas del agua subterránea y las características químicas de sustancias que tiene efectos adversos e implicaciones en la salud humana.

**Tabla 4.** VMA para las características físicas del agua (artículo 2 de la resolución 2115 de 2007). Fuente: Elaboración propia.

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color Aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable ó no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

**Tabla 5.** VMA para características químicas de sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana diferentes a los plaguicidas (artículo 5 de la resolución 2115 de 2007). Fuente: Elaboración propia.

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Valor Máximo Admitido
Antimonio (Sb) mg/L	0,02
Arsénico (As ) mg/L	0,01
Bario (Ba )mg/L	0,7
Cadmio (Cd ) mg/L	0,003
Cianuro libre y disociable (CN) mg/L	0,05
Cobre (Cu ) mg/L	1,0
Cromo total (Cr ) mg/L	0,05
Mercurio (Hg ) mg/L	0,001
Níquel (Ni) mg/L	0,02
Plomo (Pb ) mg/L	0,01
Selenio (Se ) mg/L	0,01
Trihalometanos Totales (THMs) mg/L	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) mg/L	0,01

**Tabla 6.** VMA para características químicas de sustancias que tienen implicaciones sobre la salud humana (artículo 6 de la resolución 2115 de 2007). Fuente: Elaboración propia.

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Valor Máximo Admitido
Carbono Orgánico Total (COT ) mg/L	5,0
Nitritos (NO2) mg/L	0,1
Nitratos (NO3) mg/L	10
Fluoruros (F) mg/L	1,0

## **5 Metodología**

Para la elaboración de este proyecto se contó con 72 puntos de muestreo de aguas subterráneas monitoreados por CORNARE y con tres campañas de monitoreo en los años 2016, 2018 y 2019, respectivamente. Dichos puntos corresponden a aljibes y pozos distribuidos sobre planicies y terrazas aluviales siendo parte de las unidades hidrogeológicas con potencial intermedio a alto (Mapa 3). En las campañas de monitoreo se obtuvieron datos de parámetros como: pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE), iones mayoritarios, *Escherichia Coli*, coliformes totales, turbiedad, alcalinidad, dureza, nitritos, cadmio, cobre, hierro, manganeso, mercurio, plomo y zinc, analizados en el laboratorio de CORNARE, el cual está acreditado por el IDEAM. Con estos datos se llevará a cabo el análisis hidrogeoquímico y posteriormente el de calidad de agua subterránea para esta zona.

La metodología implementada para la realización del análisis hidrogeoquímico y de calidad del agua subterránea para el VSN, se dividió en dos fases, 5.1) análisis hidrogeoquímico y 5.2) análisis de calidad del agua; basada en la metodología de EAFIT 2020.

### **5.1 Fase de análisis hidrogeoquímico**

Se inició con una etapa de recopilación y verificación de información, en la cual se obtuvieron datos de parámetros físico-químicos del agua subterránea del VSN analizados por el laboratorio de CORNARE para muestras de agua recolectadas en campañas de monitoreo de los años 2016, 2018 y 2019. Con base en los datos obtenidos se realizó una verificación de la calidad de dichos datos utilizando un libro de Excel en el cual se dispuso la información para tener un manejo práctico y rápido. En esta etapa se verificó que los datos contarán con la totalidad de parámetros requeridos para realizar el cálculo del balance iónico, se le dio un código a cada muestra para diferenciarlas entre pozos (designados con la letra P y un número del 01 al 12) y aljibes (designados con la letra A y un número de 01 a 12).

Durante la etapa de verificación, se identificó que el dato del ion bicarbonato faltaba para todas las muestras, por lo tanto, en la etapa de procesamiento, se realizó el cálculo de este ion utilizando el

valor de la alcalinidad de cada muestra multiplicándolo por la constante 1,22. Además, se realizó una conversión de las unidades de cada ion mayoritario pasándolas de mg/L a meq/L que fueron utilizados en el cálculo del balance iónico (Anexo 1 – Datos VSN).

Una vez obtenido este cálculo, se procedió a ubicar en una hoja de Excel únicamente los datos de las muestras que cumplieron con las condiciones del balance iónico, las cuales se procesaron en el software diagrammes obteniendo las facies hidrogeoquímicas y la identificación de iones dominantes para cada muestra a partir de diagramas de Piper, Stiff y Stabler. En este procesamiento, se dividieron las muestras por pozos y aljibes para realizar la representación gráfica, además se identificaron y graficaron de manera conjunta las muestras con datos en dos o tres campañas para identificar posibles variaciones en la composición del agua subterránea. Con esta identificación, se dio por finalizada la fase del análisis hidrogeoquímico.

## **5.2 Fase de análisis de la calidad del agua subterránea**

Se utilizó como base la resolución 2115 de 2007 y el decreto 1594 de 1984, con los cuales se realizó una comparación entre los valores de los parámetros que se encontraron en los datos recopilados a partir de las campañas de monitoreo, realizadas por CORNARE y los valores máximos admisibles de dichos parámetros en la resolución y el decreto nombrados anteriormente; esto con el fin de determinar cuántas y cuales muestras cumplían con lo estipulado.

Finalmente, se llevó a cabo el análisis de posibles fuentes de contaminación, utilizando la herramienta Google Earth para determinar la proximidad de suelos de usos agrícolas, industrial o residencial. Se graficaron los datos en los diagramas de Stiff y Stabler para identificar modificaciones en iones dominantes entre los años en los que se realizaron las campañas de monitoreo, y así determinar una conexión entre el uso que se le da a estos suelos y el contenido de iones que indican contaminación en las aguas subterráneas.

## 6 Resultados

A partir de la metodología, se obtuvieron los diagramas de Piper (Figura 5, Figura 6) y de Stiff (Figura 7, Figura 8). Los diagramas de Piper permitieron identificar la facies hidrogeoquímica de cada una de las muestras analizadas que cumplieron con el balance iónico. En los diagramas de Stiff se pudo identificar el catión y anión predominante para cada una de estas muestras y, en algunas de ellas, identificar cambios temporales en la composición; además, de la relación entre los valores máximos admitidos por la legislación en el decreto 1594 de 1984 con cada una de las muestras analizadas.

A partir del cálculo del balance iónico y de su comparación con la conductividad eléctrica, se encontró que, de las 72 muestras iniciales, solo 46 cumplieron con el criterio (21 para el 2016, 14 para 2018 y 9 para 2019). Estas 46 muestras fueron procesadas en el software *diagrames* y se pudo determinar, a través de diagramas de Piper, que para las muestras en aljibes la facies más representativa es la bicarbonatada cálcica entre las que se identifican: seis muestras del año 2016 (A02-Aljibe 1 Avícola la María-Inversiones Cardona, A03- Aljibe 2 Avícola la María – Inversiones Cardona, A05- Aljibe Casa de Troncos Inmunizadora SERYE SA, A08- Aljibe CORLANC, A09- Aljibe Marquillas SA, A12- Aljibe Tahami Cultiflores); tres muestras del 2018 (A01 – Pozo Gustavo Hincapie Recinto Quirama, A05 - Aljibe Casa de Troncos Inmunizadora SERYE SA, A07- Aljibe ARCLAD) y una muestra del 2019 (A03- Aljibe 2 Avícola la María – Inversiones Cardona).

Adicionalmente, para el año 2016, se identificó que cuatro muestras presentaron facies diferentes, dos con facies clorurada sódica potásica y/o sulfatada sódica (A04 - Aljibe Avícola de Oriente AVICOR, A06 – Pozo Flores el Capiro) y otros dos con facies bicarbonatada sódica potásica (A01 – Pozo Gustavo Hincapie Recinto Quirama y A07- Aljibe ARCLAD); para el año 2018, tres (3) muestras mostraron facies diferentes, dos (2) de ellas presentaron facies clorurada sulfatada cálcica magnésica (A10 – Aljibe SIKA 1, A12- Aljibe Tahami Cultiflores) y una bicarbonatada sódica potásica (A08 – Aljibe CORLANC). Finalmente, para el año 2019 una muestra mostro una facies

clorurada sulfatada cálcica magnésica (A01 – Pozo Gustavo Hincapie Recinto Quirama), lo anterior se observa en la Figura 5.

En las muestras de agua de pozos, la facies dominante fue bicarbonatada sódica y potásica entre las cuales se identificaron, cinco muestras del año 2016 (P01 – Pozo AVINAL, P03 – Pozo Senco Eurocerámica, P06- Aljibe Clínica SOMER, P10 – Pozo 2 Nacional de Chocolates, P11 – Pozo Agropecuaria los Agapantos) y cinco (5) para 2018 (P03 – Pozo Senco Eurocerámica, P04 – Pozo Sociedad Laguna Larga, P09 – Pozo 1 Nacional de Chocolates, P10 – Pozo 2 Nacional de Chocolates, P11 – Pozo Agropecuaria los Agapantos) (Figura 6).

Las facies para las muestras del año 2019 seis fueron cloruradas y sulfatadas-cálcicas y magnésicas (P05 – Aljibe Alimentos Cárnicos, P06- Aljibe Clínica SOMER, P07 – Aljibe COLRESIN, P08 – Aljibe Flores Altagracia, P11 – Pozo Agropecuaria los Agapantos, P12 – Pozo Inmunizar) (Figura 6).

En cuanto a los pozos con facies diferentes, se identificó para el 2016 dos muestras en facies bicarbonatada cálcica (P02 – Pozo NOVAVENTA, P05- Aljibe Alimentos Cárnicos), dos muestras en facies clorurada sódica potásica y/o sulfatada sódica (P04 – Pozo Sociedad Laguna Larga, P08 – Aljibe Flores Altagracia) y dos muestras en facies clorurada sulfatada cálcica magnésica (P07 – Aljibe COLRESIN, P09 – Pozo 1 Nacional de Chocolates). Para el año 2018 se identificaron dos muestras en facies bicarbonatada cálcica (P05- Aljibe Alimentos Cárnicos, P12 – Pozo Inmunizar), dos en facies cloruradas y sulfatadas-cálcicas y magnésicas (P07 – Aljibe COLRESIN, P08 – Aljibe Flores Altagracia) y una en facies clorurada sódica potásica y/o sulfatada sódica (P06- Aljibe Clínica SOMER). Para el año 2019 una muestra arrojó una facies bicarbonatada cálcica (P03 – Pozo Senco Eurocerámica) (Figura 6).

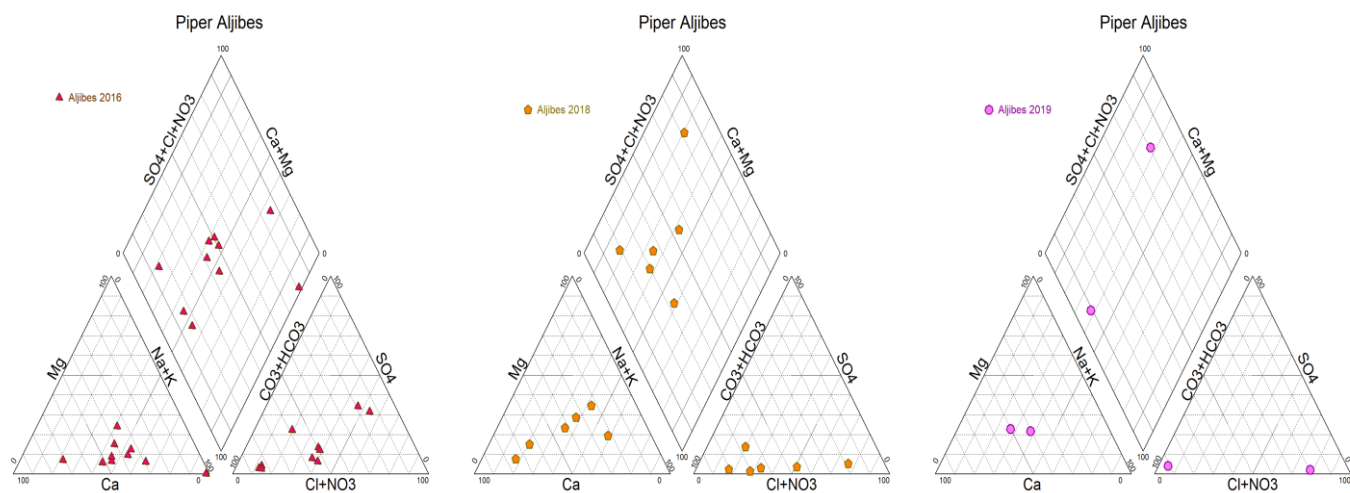


Figura 5. Diagramas de Piper para las muestras de Aljibes. Fuente: Elaboración propia

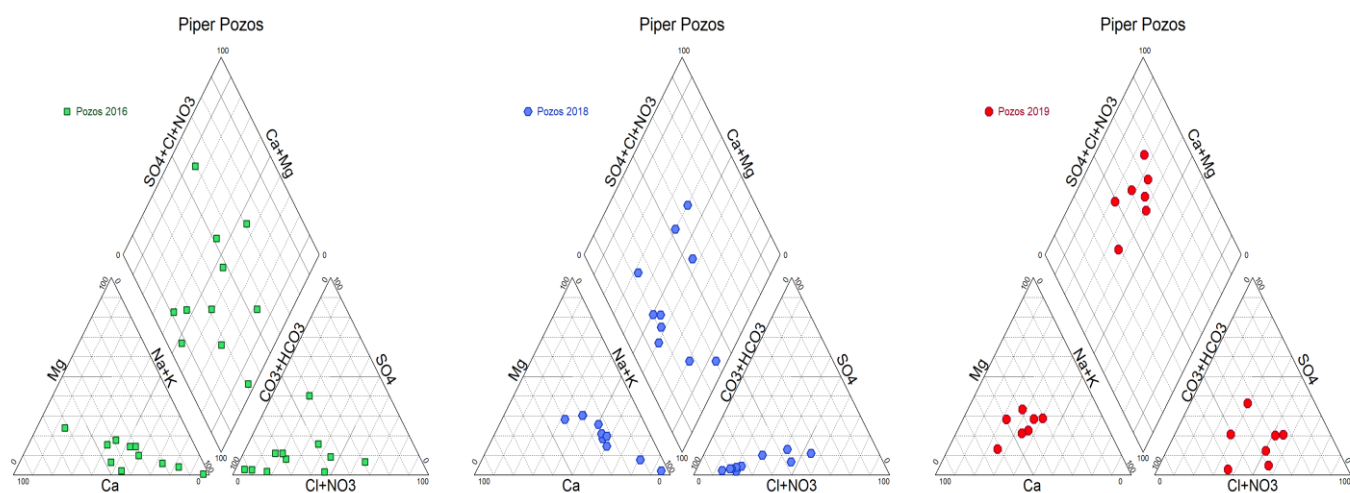


Figura 6. Diagramas de Piper para las muestras de Pozos. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los diagramas de Stiff, se observa una variación entre los cationes de Na + K y Ca y entre los aniones  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$  y Cl para las muestras de los aljibes en las tres campañas. Para el año 2016 se observa que siete (7) muestras presentan Na + K como catión dominante (A01 – Pozo Gustavo Hincapie Recinto Quirama, A03- Aljibe 2 Avícola la María – Inversiones Cardona, A04 - Aljibe Avícola de Oriente AVICOR, A06 – Pozo Flores el Capiro, A07- Aljibe ARCLAD, A08 – Aljibe CORLANC, A12- Aljibe Tahami Cultiflores) y tres más indican una predominancia de Ca (A02-



Aljibe 1 Avícola la María-Inversiones Cardona, A05- Aljibe Casa de Troncos Inmunizadora SERYE SA, A09- Aljibe Marquillas SA) .

En cuanto a los aniones, ocho muestras presentan  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$  en mayor concentración (A01 – Pozo Gustavo Hincapie Recinto Quirama, A02-Aljibe 1 Avícola la María-Inversiones Cardona , A03- Aljibe 2 Avícola la María – Inversiones Cardona, A05- Aljibe Casa de Troncos Inmunizadora SERYE SA, A07- Aljibe ARCLAD, A08 – Aljibe CORLANC, A09- Aljibe Marquillas SA, A12- Aljibe Tahami Cultiflores) mientras que otras dos indican un mayor contenido de Cl (A04 - Aljibe Avícola de Oriente AVICOR, A06 – Pozo Flores el Capiro) (Figura 7).

Para el año 2018, tres (3) muestras indicaron mayor concentración de Na + K (A07- Aljibe ARCLAD, A08 – Aljibe CORLANC, A12- Aljibe Tahami Cultiflores), mientras que en otras tres (3) predomina el catión Ca (A01 – Pozo Gustavo Hincapie Recinto Quirama, A05- Aljibe Casa de Troncos Inmunizadora SERYE SA, A10 – Aljibe SIKA 1). En cuanto al anión dominante, las seis (6) muestras presentan  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$  en mayor concentración. Con base en los resultados para el año 2019, una de las muestras presenta predominancia de Ca y Cl (A01 – Pozo Gustavo Hincapie Recinto Quirama), mientras que la otra presenta mayor contenido de  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$  y Ca (A03- Aljibe 2 Avícola la María – Inversiones Cardona) (Figura 7).

En cuanto a las muestras de los pozos tomadas en el año 2016, ocho presentan Na + K como catión dominante (P01 – Pozo AVINAL, P03 – Pozo Senco Eurocerámica, P04 – Pozo Sociedad Laguna Larga, P06- Aljibe Clínica SOMER, P07 – Aljibe COLRESIN, P08 – Aljibe Flores Altagracia, P10 – Pozo 2 Nacional de Chocolates, P11 – Pozo Agropecuaria los Agapantos) y tres (3) más indican Ca como catión dominante (P02 – Pozo NOVAVENTA, P05- Aljibe Alimentos Cárnicos, P09 – Pozo 1 Nacional de Chocolates), por su parte, nueve (9) muestras indican un alto contenido de  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$  (P01 – Pozo AVINAL, P02 – Pozo NOVAVENTA, P03 – Pozo Senco Eurocerámica, P04 – Pozo Sociedad Laguna Larga, P06- Aljibe Clínica SOMER, P07 – Aljibe COLRESIN, P10 – Pozo 2

Nacional de Chocolates, P11 – Pozo Agropecuaria los Agapantos) y dos (2) de Cl como aniones dominantes (P08 – Aljibe Flores Altagracia, P09 – Pozo 1 Nacional de Chocolates) (Figura 8).

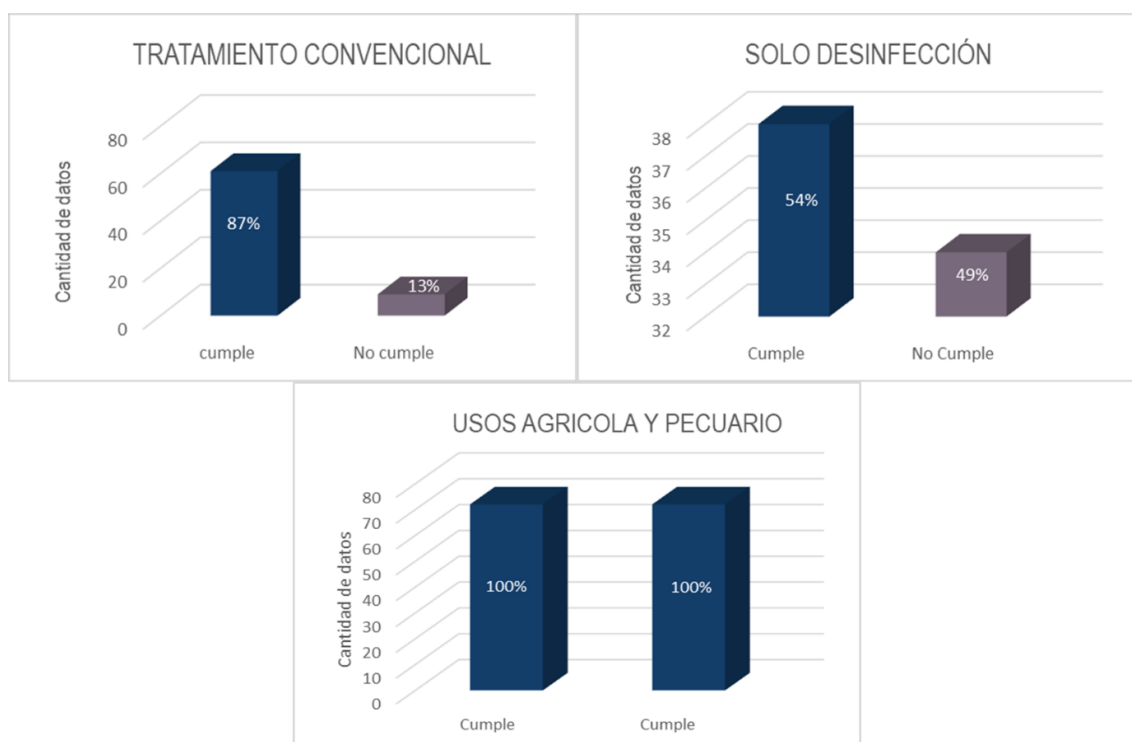
Las muestras tomadas en el 2018 presentan una predominancia de Na + K para las diez (10) muestras analizadas (P03 – Pozo Senco Eurocerámica, P04 – Pozo Sociedad Laguna Larga, P05- Aljibe Alimentos Cárnicos, P06- Aljibe Clínica SOMER, P07 – Aljibe COLRESIN, P08 – Aljibe Flores Altagracia, P09 – Pozo 1 Nacional de Chocolates, P10 – Pozo 2 Nacional de Chocolates, P11 – Pozo Agropecuaria los Agapantos, P12 – Pozo Inmunizar), mientras que los aniones varían con nueve (9) muestras con mayor contenido  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$  (P03 – Pozo Senco Eurocerámica, P04 – Pozo Sociedad Laguna Larga, P05- Aljibe Alimentos Cárnicos, P06- Aljibe Clínica SOMER, P08 – Aljibe Flores Altagracia, P09 – Pozo 1 Nacional de Chocolates, P10 – Pozo 2 Nacional de Chocolates, P11 – Pozo Agropecuaria los Agapantos, P12 – Pozo Inmunizar) y una (1) con mayor contenido de Cl (P07 – Aljibe COLRESIN) (Figura 8).

Las muestras tomadas en el 2019 indican cinco (5) con mayor contenido en Ca (P03 – Pozo Senco Eurocerámica, P05- Aljibe Alimentos Cárnicos, P06- Aljibe Clínica SOMER, P11 – Pozo Agropecuaria los Agapantos, P12 – Pozo Inmunizar) dos (2) con contenidos mayores en Na + K (P07 – Aljibe COLRESIN, P08 – Aljibe Flores Altagracia) y para los aniones, cuatro (4) presentan Cl como ion dominante (P06- Aljibe Clínica SOMER, P08 – Aljibe Flores Altagracia, P11 – Pozo Agropecuaria los Agapantos, P12 – Pozo Inmunizar), dos (2) presentan  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$  (P03 – Pozo Senco Eurocerámica, P05- Aljibe Alimentos Cárnicos) y una (1) presenta  $\text{SO}_4$  (P07 – Aljibe COLRESIN) (Figura 8).

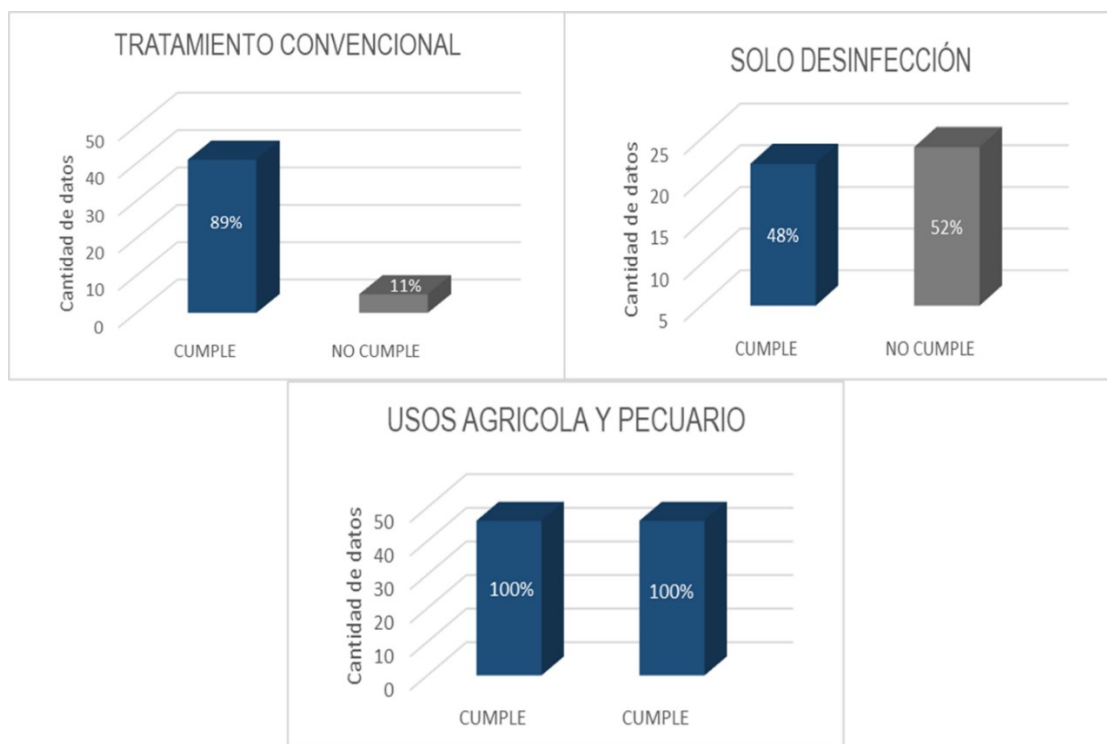


Las 72 muestras se compararon con la legislación colombiana, sin importar si cumplían o no con el balance iónico. Se obtuvo que para el decreto 1594 de 1984, 61 muestras correspondientes a un 87% cumplen con los VMA para el artículo 38 relacionado al tratamiento convencional; 38 muestras correspondientes al 54% cumplen con los valores establecidos en el artículo 39 y el 100% de las muestras cumplen con los valores establecidos en los artículos 40 y 41 (Figura 9). Dos (2) de las muestras no pudieron ser comparadas debido a que no tenían valores para hacerlo, por lo tanto, se encuentran los porcentajes sobre 70 muestras y no sobre 72.

Además de comparar la totalidad de las muestras, se realizó una comparación solo con las muestras que cumplieron con el balance iónico, en las cuales, 41 muestras cumplieron con lo estipulado en el artículo 38, 22 cumplieron con el 39, 46 con los artículos 40 y 41 (Figura 10). Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

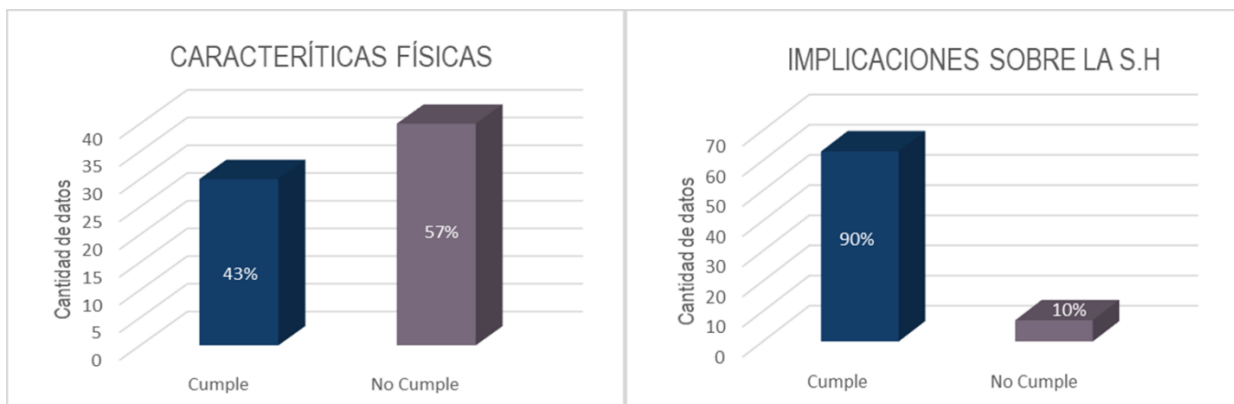


**Figura 9.** Comparación del total de muestras con el Decreto 1594 de 1984. Fuente: Elaboración propia.

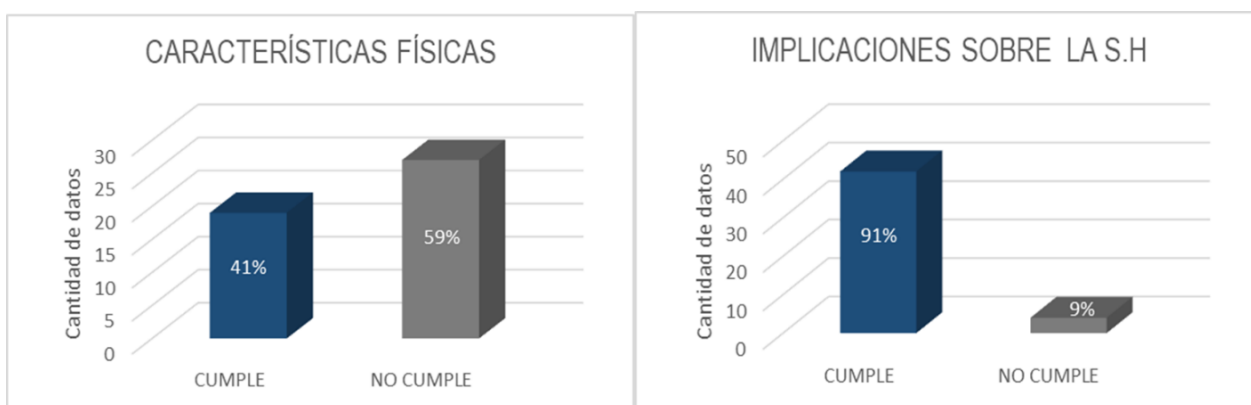


**Figura 10.** Comparación de muestras que cumplieron con el BI con el Decreto 1594 de 1984. Fuente: Elaboración propia.

Con base en la comparación con la resolución 2115 de 2007, 30 de las muestras analizadas correspondientes a un 43% cumplen con los VMA para el artículo 2 en el cual se evalúan las características físicas para el agua subterránea; el 100% de las muestras cumple con los valores admitidos para el artículo 5 relacionado con los efectos adversos de las características químicas de algunas sustancias sobre la salud humana y finalmente, 63 muestras correspondientes al 90% cumplen con lo estipulado en el artículo 6 sobre implicaciones en la salud humana debido a características químicas de algunas sustancias (Figura 11). Al tomar solo las muestras que cumplieron con el balance iónico, se encontró que 19 de ellas cumplen con lo estipulado en el artículo 2, 46 con el 5 y 42 con el 6 (Figura 12).



**Figura 11.** Comparación de muestras totales con la resolución 2115 de 2007. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 12.** Comparación de muestras que cumplieron con el BI con la resolución 2115 de 2007. Fuente: Elaboración propia.

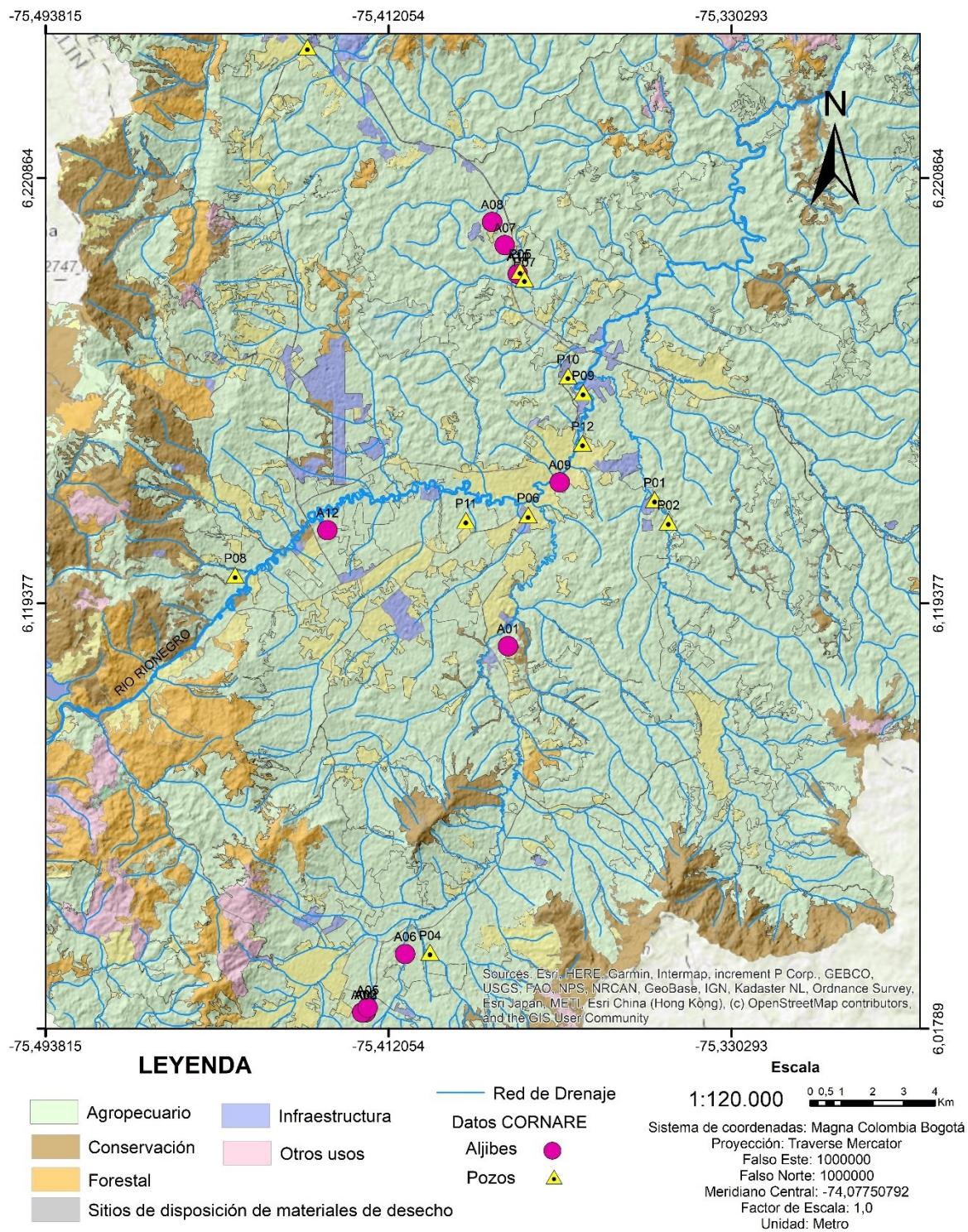
## **7 Discusión**

En este proyecto se analizaron detalladamente los parámetros físicos y químicos del agua subterránea para el VSN, se encontró que esta agua **si** puede ser una fuente potencial de abastecimiento de la población en la medida en que se realicen los tratamientos necesarios para su potabilización; además que las principales fuentes de contaminación son domésticas y agrícolas.

A partir de los resultados obtenidos se logró identificar que, a través del tiempo, el ion que aumentó en mayor cantidad fue el cloruro, seguido del magnesio; también se observaron aumentos en sodio, potasio y sulfatos. Se evidenció a partir de imágenes de Google Earth y de un mapa de coberturas del suelo (Mapa 4), que los puntos de muestreo con mayores contenidos en estos iones se encuentran en suelos de uso residencial y agrícola, principalmente, aunque también se identificaron en suelos de uso industrial.

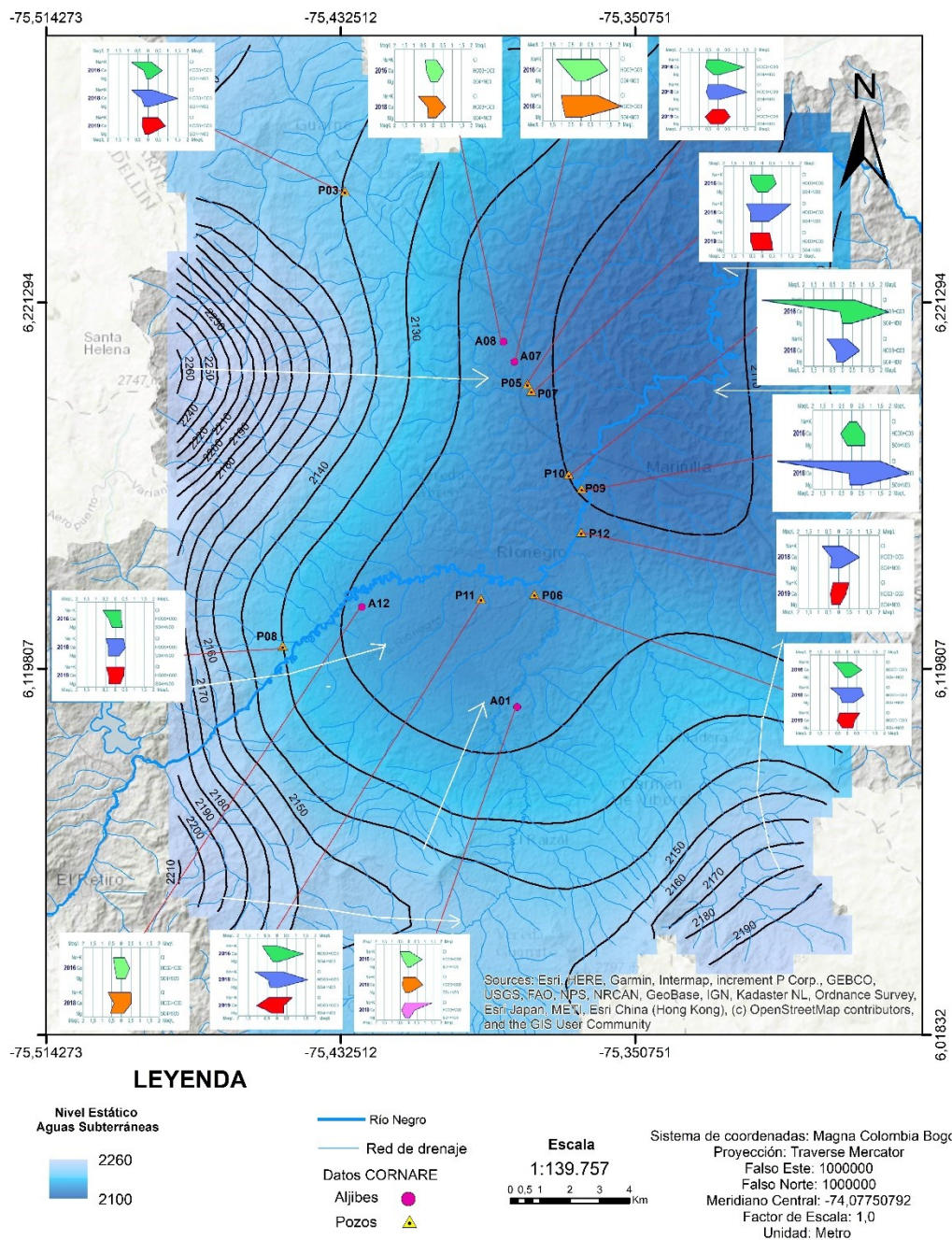
A continuación, se pueden observar las variaciones químicas en las muestras durante las campañas realizadas por CORNARE, analizadas en este documento y con las cuales se pueden identificar posibles focos de contaminación con base en las actividades antrópicas que se realizan en sus proximidades e interacciones con el ambiente geológico al cual pertenecen.





**Mapa 4.** Cobertura de suelo. Fuente: Elaboración propia, con datos de Universidad EAFIT 2020.





**Mapa 5.** Líneas de flujo del agua subterránea. Fuente: Elaboración propia, con datos de Universidad EAFIT

2020

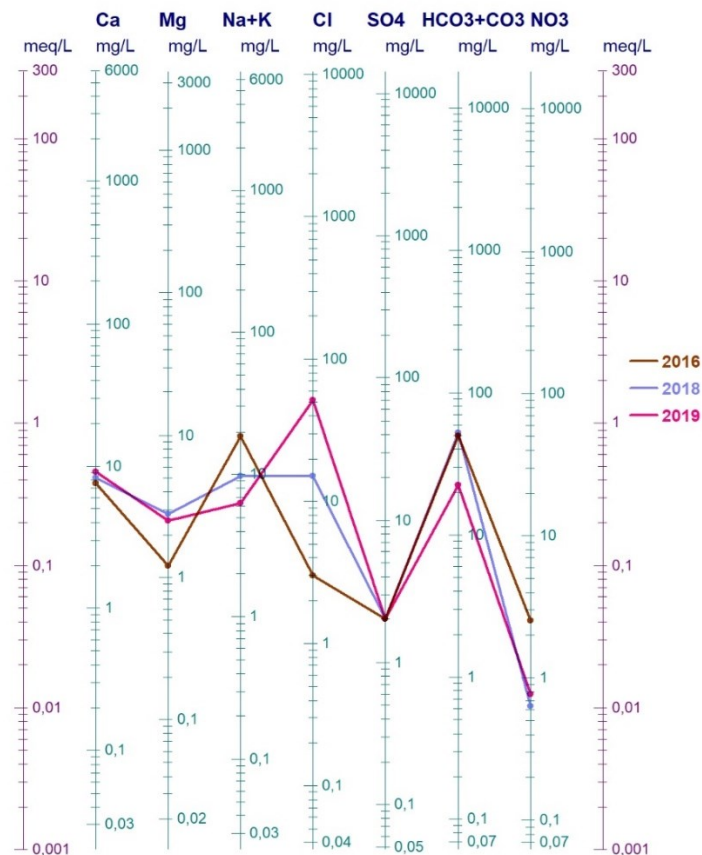
Al analizar los iones mayoritarios, se identificó que las muestras con mayores variaciones en cuanto al contenido de cloruros fueron A01, P03, P05, P06, P09, P11 y P12 (Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20). El aumento de este ion generalmente está relacionado

a uso de fertilizantes en los que es mezclado con otros iones, o a procesos de limpieza y desinfección de los hogares con el uso de detergentes (Panno et al., 2006). Con base en la geología de la zona no se encuentra una relación entre el aumento de este ion y los minerales presentes en las rocas.

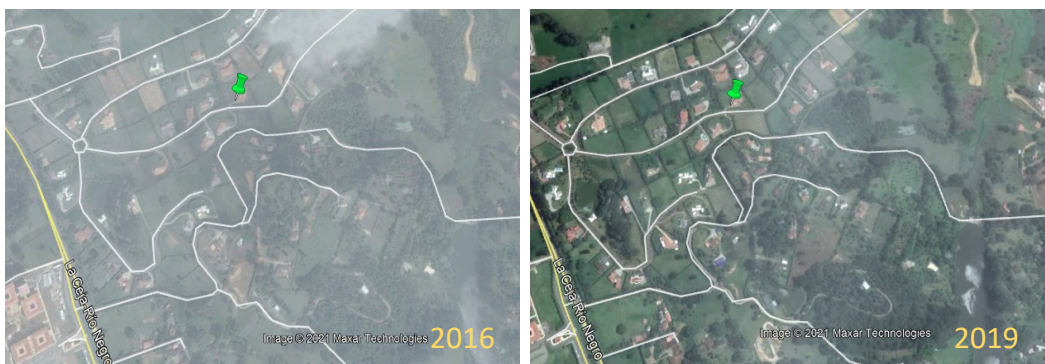
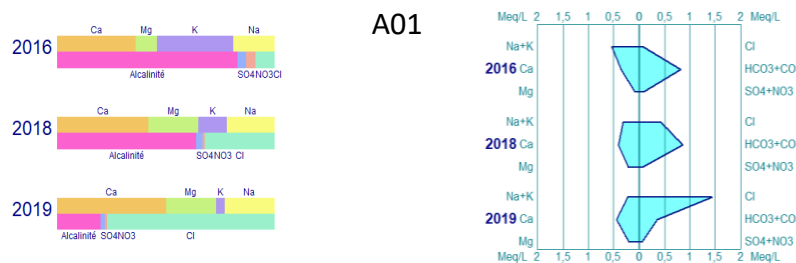
El almacenamiento y disposición inadecuado de químicos domésticos como pinturas, detergentes sintéticos, aceites solventes, medicinas, desinfectantes, químicos de piscinas, pesticidas, baterías, combustibles de gasolina y diesel puede provocar la contaminación de las aguas subterráneas (Lenntech, 2021).

Algunas de las formas más comunes en las que pueden hallarse cloruros en las aguas subterráneas es por la acción de detergentes debido a su contenido de sales en la composición (Falconí, 2017), en las cañerías fabricadas con cloruro de polivinilo (PVC), en compañías en las que producen dicloruro de etileno y otros disolventes clorinados, clorofluorocarbonos (CFCs) y óxido de propileno; como desinfectante en plantas de tratamientos de agua e incluso en las clínicas para reducir los niveles de microorganismos que pueden propagar enfermedades entre los humanos (Lenntech, 2021).

Para la muestra A01 – Pozo Gustavo Hincapie Recinto Quirama, ubicado en el municipio de Carmen de Viboral, se observó una variación significativa en cuanto al contenido de Cl que pasó de tener una concentración de aproximadamente 2 mg/L en 2016 a 40 mg/L en 2019, además de una variación en el contenido de Mg para los mismos años (Figura 13). En las imágenes de Google Earth se puede observar una pequeña variación en cuanto a la expansión urbana que ha tenido esta zona en particular entre los años 2016 y 2019, lo que podría corroborar los aumentos de Cl en el agua subterránea debido al uso doméstico (Figura 14).

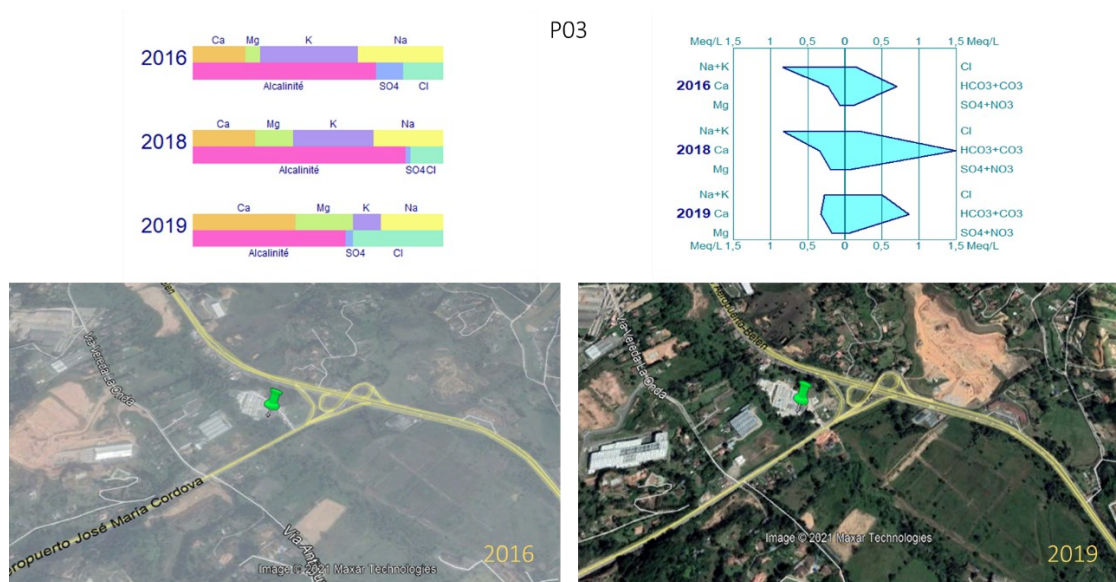


**Figura 13.** Representación gráfica de la concentración iónica en la muestra A01. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 14.** Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

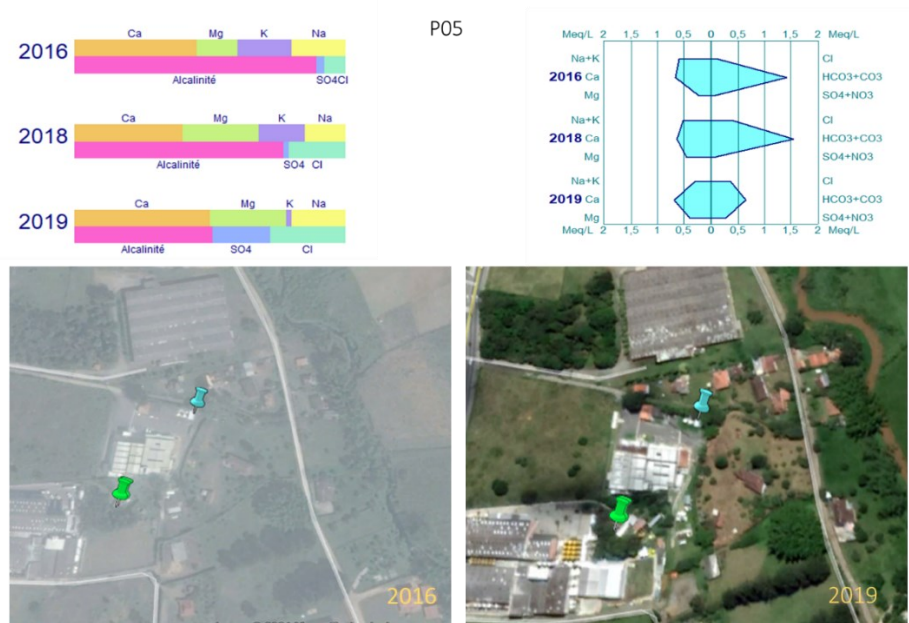
La muestra P03 – Pozo Senco Eurocerámica, ubicada en el municipio de Guarne, presenta una baja variación en la expansión urbana, pero al analizar el aumento de Cl en el agua de este pozo se observa una variación que va de aproximadamente 0,2 meq/L en el 2016, a 0,5 meq/L en 2019 (Figura 15); por lo que se podría atribuir este aumento a las actividades domésticas e industriales de la zona.



**Figura 15.** Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

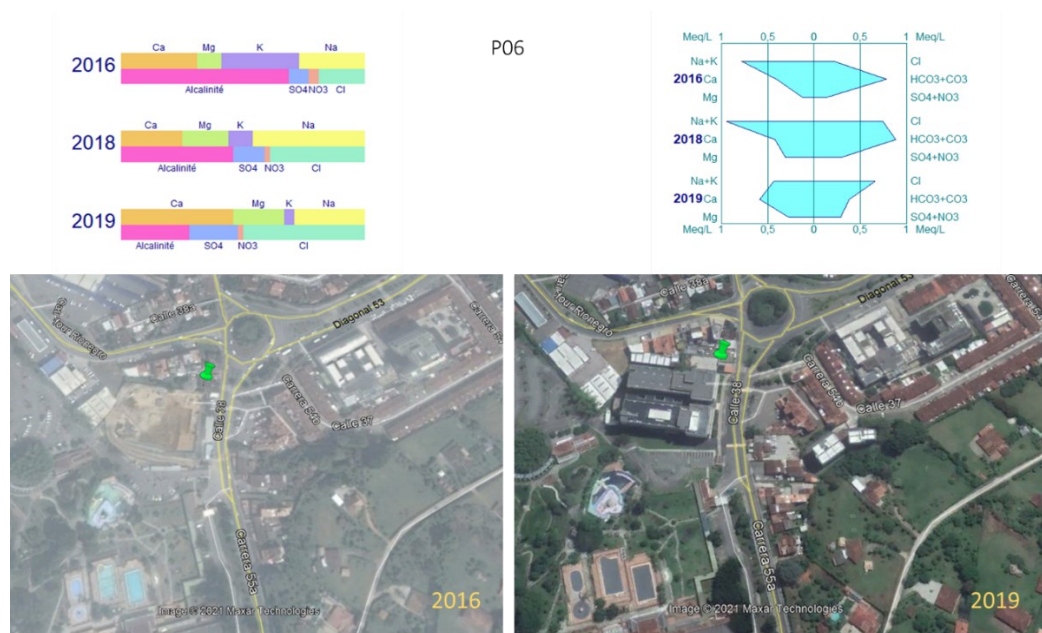
En cuanto a la muestra P05– Aljibe Alimentos Cárnicos, ubicada en el municipio de Rionegro, no se observa una variación en el aumento de la urbanización, pero si es posible observar una posible expansión del sector industrial en el área, lo que podría estar ocasionando el aumento del Cl en la zona, posiblemente como un agente desinfectante para reducir microorganismos presentes en los procesos de las actividades relacionadas a la producción de alimentos. Además, se observa un aumento en el contenido de sulfatos que podría estar relacionado a materiales utilizados en la producción de químicos para el sector de la construcción, actividad económica que desarrolla la empresa Sika (Figura 16).





**Figura 16.** Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

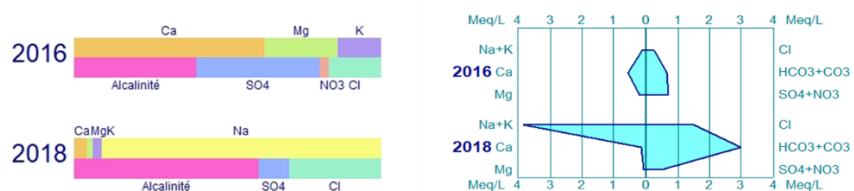
Al analizar la muestra P06- Aljibe clínica SOMER, ubicada en el municipio de Rionegro, se observó que el posible aumento del ion Cl se debe al funcionamiento de nueva infraestructura hospitalaria en la zona, para fines desinfectantes, para el año 2016 las concentraciones de este ion eran bajas comparadas con las del 2019 para las cuales ya se había construido dicha infraestructura.



**Figura 17.** Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

La muestra P09 – Pozo 1 Nacional de Chocolates ubicada en el municipio de Rionegro, corresponde a un pozo ubicado en un predio de la empresa Nacional de Chocolates, sobre el cual no se observa una variación significativa en la expansión a lo largo de las campañas de muestreo. Una posible causa de este aumento en el Cl (Figura 18) puede ser las prácticas de limpieza que implementan las empresas aledañas y las viviendas de esta zona a través de río Negro, ya que el pozo se ubica aguas abajo de la cabecera municipal de Rionegro.

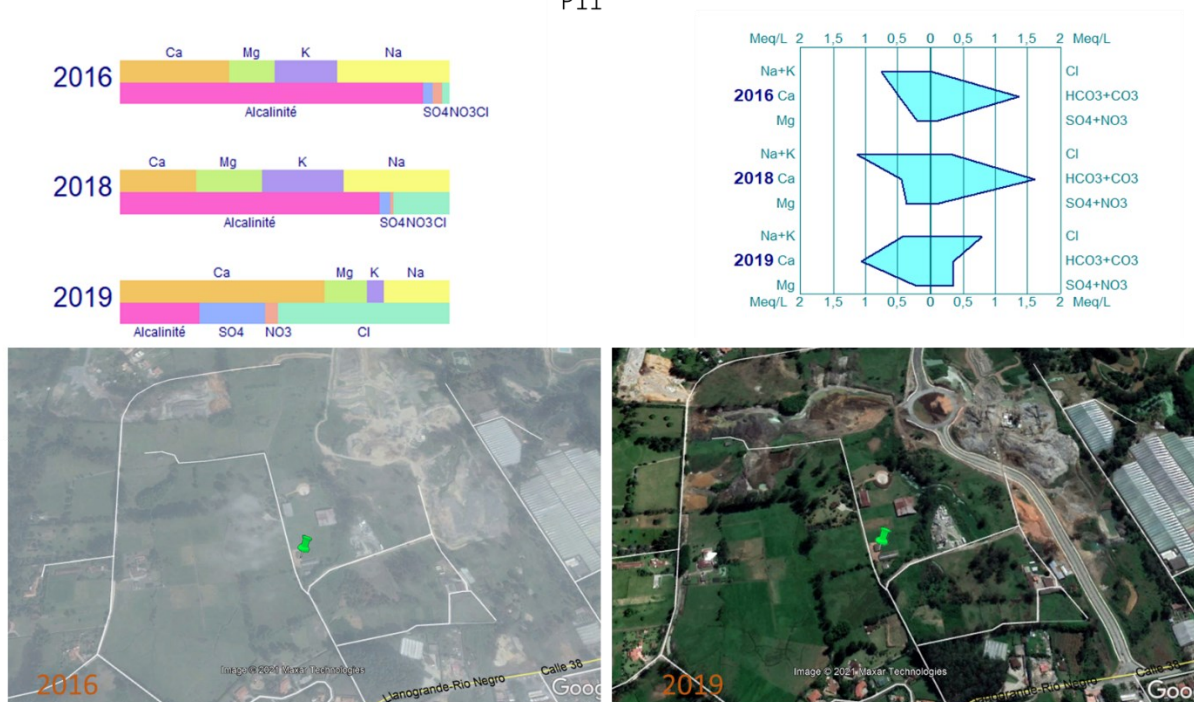
También se observan variaciones en la alcalinidad la cual, para esta muestra aumenta en el año 2019 relacionado al aumento de pH que ara el 2016 presentó valores de 5,98 (ácido) a 7,88 (básico) en 2019, así como aumento en el Na que podría ser utilizado en fertilizantes, y una disminución en los sulfatos posiblemente por la acción de bacterias o por sistemas de tratamiento de agua potable (Lenntech, 2021).



**Figura 18.** Representación gráfica aumento de Cl. Fuente: Elaboración propia.

Durante el análisis de la muestra P11 - Pozo Agropecuaria los Agapantos ubicado en el municipio de Rionegro, se identificó un uso agrícola, en el cual se puede utilizar Cl y sulfatos como constituyente de algún fertilizante para los cultivos como, por ejemplo: KCl (muriato de potasio), CaCl2 (cloruro de calcio), NH4Cl (cloruro amónico), MgCl2 (cloruro de magnesio), sulfato de amonio, entre otros (Figura 19).

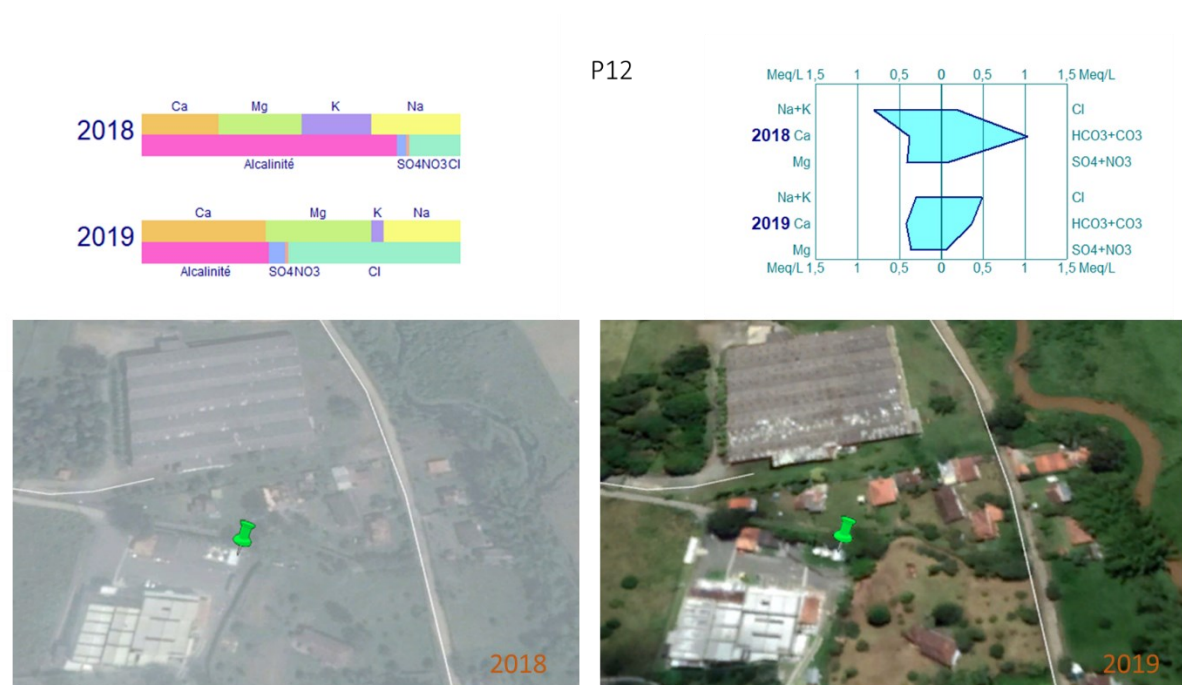
P11



**Figura 19.** Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Para la muestra P12 – Pozo Inmunizar ubicado en el municipio de Rionegro, se observa un aumento significativo en el Cl (Figura 20), pero no se ve relacionado a una fuente doméstica, debido a que no se observa una expansión en la zona.

En cuanto a la actividad económica se identificó una empresa dedicada a inmunizar maderas, posiblemente el aumento de este ion esté relacionado utilizan diversos químicos para inmunizar la madera como por ejemplo el bórax que es un tipo de sal utilizada para curar la madera con alto contenido de agua, inhibir el fuego y mantener alejados los insectos que la pudren (Walsh, 2018), este químico podría estar relacionado con el contenido de Cl.

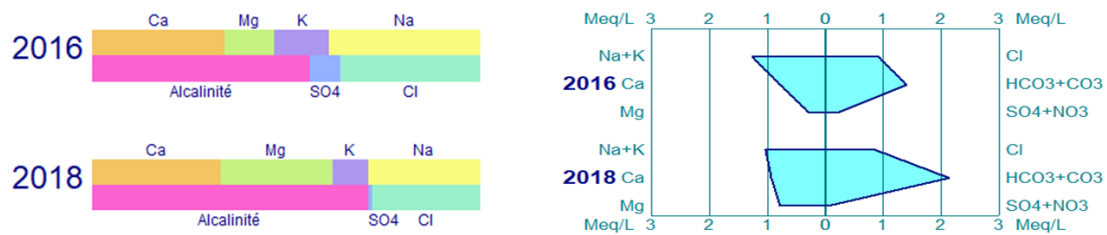


**Figura 20.** Representación gráfica aumento de Cl y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Entre las muestras con aumentos en el catión magnesio, se destacan A07, A12, P08, P10 (Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24). El magnesio tiene muchos propósitos y consecuentemente finaliza en el agua de maneras muy distintas. La industria química añade magnesio a los plásticos y a otros materiales como una medida de protección contra el fuego o como material de relleno. Otra forma de finalizar en el medio ambiente es como fertilizante y como alimentación de ganados, las aleaciones del magnesio se aplican en la construcción de coches y de aviones, también es utilizado en calentadores (Lenntech, 2021). Las variaciones a través de las campañas de monitoreo para estos iones se observan a continuación.

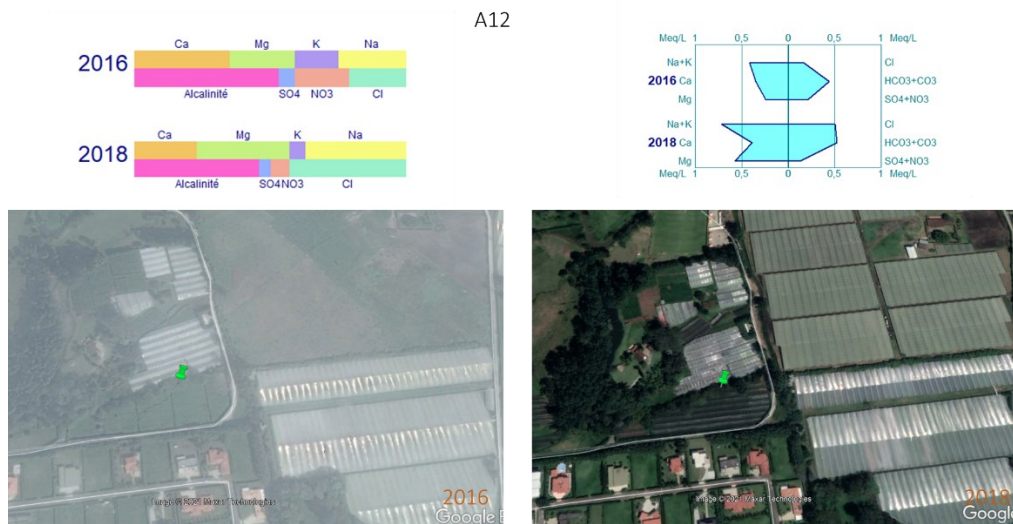
La muestra A07- Aljibe ARCLAD ubicada en el municipio de Rionegro, no presenta variaciones en cuanto a expansión urbana, por lo que se puede inferir que la contribución al aumento de magnesio en el agua subterránea se deba posiblemente a la actividad económica que se realiza en este sector, como lo es la fabricación de materiales autoadhesivos en los que se involucra el uso de plástico (Figura 21).



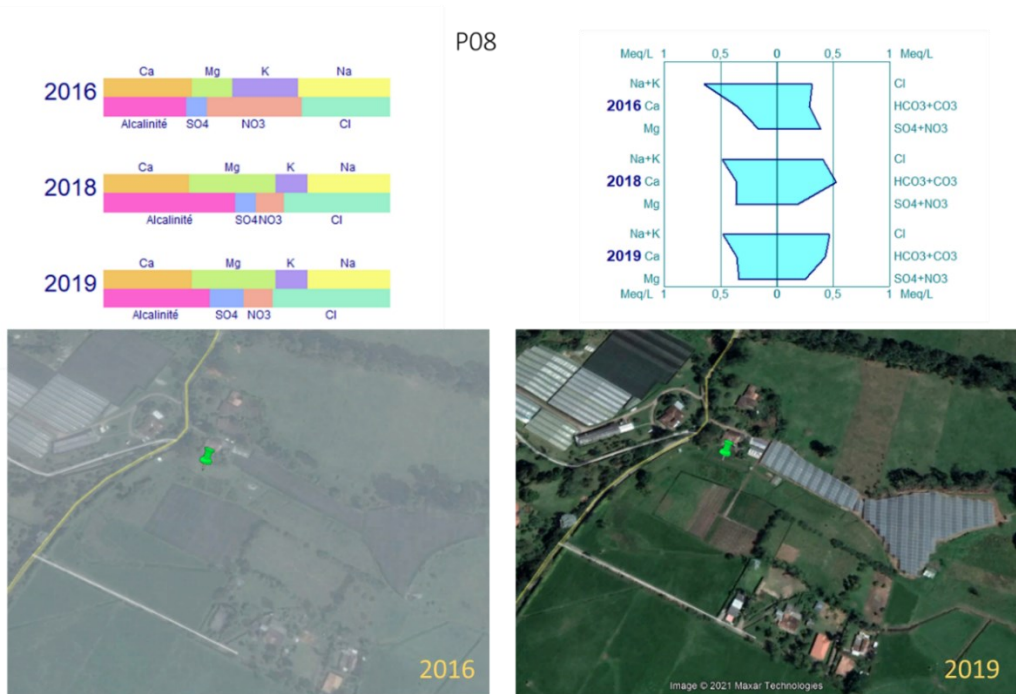


**Figura 21.** Representación gráfica aumento de Mg. Fuente: Elaboración propia.

Al analizar el uso del suelo de las muestras A12- Aljibe Tahami Cultiflores (Figura 22) y P08– Aljibe Flores Altagracia ubicadas en el municipio de Rionegro (Figura 23), se observó la presencia de cultivos de flores en dichas zonas, lo que podría estar relacionado con el aumento de Mg debido al uso de fertilizante para dichos cultivos. Otra fuente de este elemento podría estar relacionado con la meteorización de minerales como hornblenda o biotita presentes en las rocas de la zona (Batolito Antioqueño).

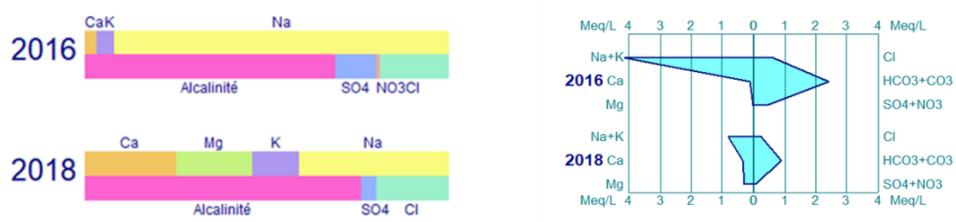


**Figura 22.** Representación gráfica aumento de Mg y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.



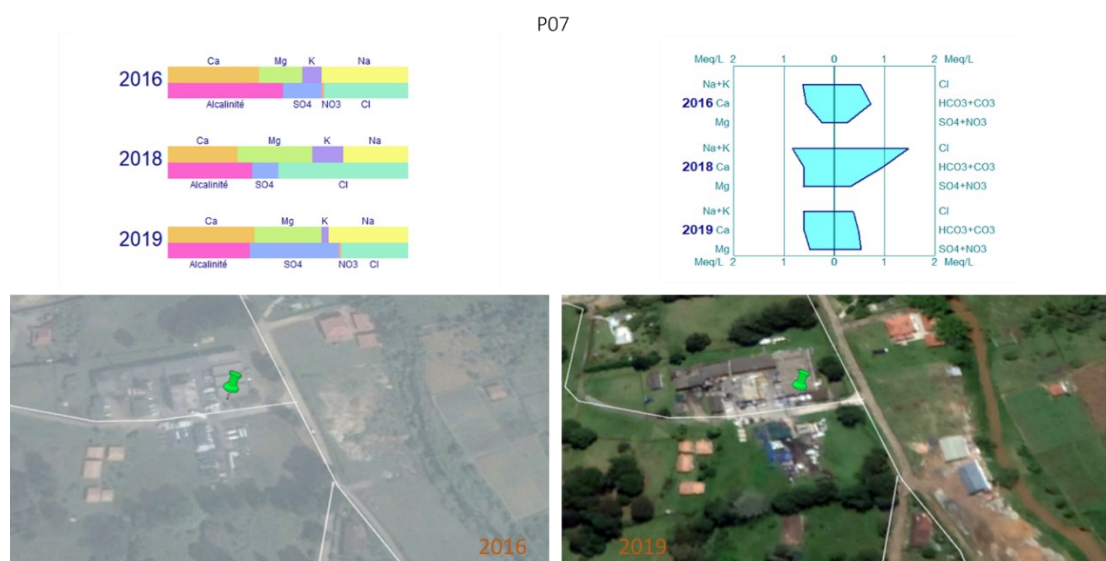
**Figura 23.** Representación gráfica aumento de Mg y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Para la muestra P10 – Pozo 2 Nacional de Chocolates ubicada en el municipio de Rionegro, no se encontró ninguna variación en cuanto al uso o expansión del suelo; sin embargo, se pasa de tener altas concentraciones de Na en el 2016 aproximadamente de 4 meq/L y ninguna en Mg, a presentar aumentos aproximadamente a 0,4 meq/L en 2018 (Figura 24). Lastimosamente, no es posible determinar puntualmente el porqué de esta variación, debido a que no se tiene suficiente información sobre las sustancias que se utilizan en las actividades que se realizan cerca al pozo lo que podría ser una causa de este aumento, otra posibilidad podría ser como producto de la meteorización de minerales en los cuales se encuentra presente este elemento debido a la disolución de estos iones al contacto con el agua.



**Figura 24.** Representación gráfica aumento de Mg. Fuente: Elaboración propia.

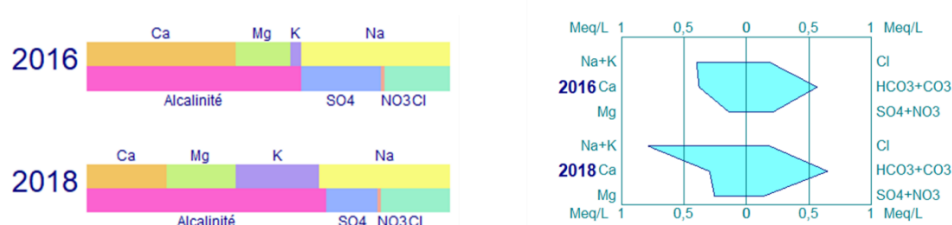
Finalmente, se identificó para la muestra P07– Aljibe COLRESIN ubicado en el municipio de Rionegro, un aumento o en el ion de sulfato ( $\text{SO}_4$ ), el cual varia de 0,2 meq/L en 2016 a 0,5 meq/L en 2019 aproximadamente. Esta zona se desarrolla una actividad económica relacionada con la fabricación de resinas, en la cual posiblemente el uso de este ion genere aumentos de este en las aguas subterráneas, debido a que los sulfatos son utilizados en esta industria para obtener la materia prima para las resinas celulósicas, además son uno de los ingredientes más importantes en la fabricación de pigmentos de pinturas también utilizados en las resinas (Universidad de Guayaquil, 2005) (**Figura 25**).



**Figura 25.** Representación gráfica aumento de  $\text{SO}_4$  y variación del uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Además, se observó un aumento de potasio en la muestra A08, en la cual se identificó un uso de suelo industrial en el cual se fabrican pinturas, donde posiblemente utilice como un constituyente principal de las pinturas de silicato, por su capacidad de adherencia (Figura 26) (Keim, 2021).

**Figura 26.** Representación gráfica aumento



Elaboración propia.

de K. Fuente:

Con base en las muestras expuestas anteriormente, podemos suponer que las principales fuentes de contaminación en las aguas subterráneas efectivamente son de carácter doméstico y por las actividades económicas como industrias químicas y sector agropecuario. A nivel geológico, los procesos de meteorización pueden contribuir con el aumento de iones como Na, Ca y K, por lo cual no se descarta la posibilidad de que esto ocurra, sin embargo, estos aumentos se podrían identificar con análisis de los depósitos en los que ubican dichas muestras.

Algunas de las fuentes de estos iones como potenciales contaminantes son debido a: actividades domésticas entre las cuales se encuentran el uso de detergentes, calentadores de agua, jabones líquidos, , pozos sépticos, por procesos biológicos de bacterias, residuos humanos, químicos de piscinas, baterías; por actividades industriales en la fabricación de pinturas, aleaciones para construcción de vehículos, resinas, plantas de tratamiento de agua, alimentos, industria textil, plásticos, producción de fósforos, fabricación de tuberías. Además, en el uso de fertilizantes en el sector agrícola y en el alimento de los animales (Lenntech, 2021; Panno et al., 2006; Falconí et al., 2017; Universidad de Guayaquil, 2005).

En cuanto a los análisis de calidad del agua subterránea, se logró observar que el mayor porcentaje de las muestras cumplió con las estipulaciones de la legislación y que, por lo tanto, es factible utilizarla como una fuente de abastecimiento después de realizarse un tratamiento de potabilización convencional. Sin embargo, se identifican vacíos al momento de procesar las muestras ya que la totalidad de los parámetros requeridos para las comparaciones según la legislación, no se midieron

para las muestras analizadas como lo son, por ejemplo: arsénico, níquel, cromo, aceites, hidrocarburos.

## 8 Conclusiones

Con base en los análisis realizados, se lograron identificar algunas fuentes potenciales de contaminación de tipo doméstico, industrial y agrícola principalmente por usos de fertilizantes, detergentes y compuestos químicos, los cuales presentan iones como Cl, Mg, SO<sub>4</sub> y K. Estos iones se encuentran en las muestras de agua subterránea en contenidos que incrementan a lo largo de las campañas de monitoreo cuya aparición se identifica como una posible causa de contaminación en el agua, el municipio con mayores concentraciones es Rionegro, posiblemente por presentar mayor población en comparación con los demás que conforman el VSN.

La identificación de contaminantes se ve limitada debido a la falta de información sobre las actividades que se realizan en la zona, ya que, según las imágenes satelitales utilizadas y la caracterización del uso de suelo, solo se observan suelos residenciales, industriales y agrícolas, pero no se logra identificar exactamente la actividad y menos los productos que se utilizan para su desarrollo.

Partiendo de los análisis en cuanto a la calidad del agua, se encontró viable la utilización de recurso según las comparaciones con el decreto 1594 de 1984 y la resolución 2115 de 2007 sobre los tratamientos y características que debe tener el agua para ser utilizada como fuente de abastecimiento, a pesar de contar con una deficiencia en la cantidad de parámetros medidos para las muestras requeridos por la legislación.

A pesar de contar con muestras de diferentes campañas de monitoreo, existen vacíos en la información en cuanto a parámetros químicos necesarios para realizar un análisis exacto de las características del agua. También existen vacíos en cuanto a la composición química de los depósitos no consolidados, en los cuales se ubican las muestras analizadas para realizar una adecuada identificación de las fuentes de iones con altos incrementos en su concentración en los intervalos de tiempo de una campaña a otra y que se logran identificar por medio de los diagramas presentados.

Se recomienda realizar estudios con mayor detalle para estimar los principales contaminantes y sus fuentes con el objetivo de identificar y minimizar el impacto de estos agentes contaminantes en las aguas subterráneas, así como la medición de todos los parámetros químicos y físicos requeridos para un análisis de calidad que cumpla con los requerimientos de la legislación.

## 9 Bibliografía

- Appelo, C.A.J. and Postma, D. 1996. Geochemistry, Groundwater & Pollution. Balkema, Rotterdam.
- CORNARE 2015. Plan de Crecimiento Verde y Desarrollo Compatible con el Clima para el Oriente Antioqueño Anexo 1. Análisis socioeconómico.
- CORNARE 2016. Plan de Crecimiento Verde y Desarrollo Compatible con el Clima para el Oriente Antioqueño Anexo 4. Actividad económica actual en el Oriente Antioqueño y perspectivas de crecimiento verde y desarrollo compatible con el clima.
- Custodio, E., Llamas, M. 1996. Hidrología Subterránea. Tomo I y II. Ed. Omega, Barcelona España. 2da. Edición corregida.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2021. geoportal
- Freeze, R, A., Cherry, J, A. 1979. Groundwater. Nueva Jersey, Estados Unidos de América.
- Falconí Jurado Eulalia; Sáenz Yaya Domingo, Velásquez Mario; Azáldegui Moscol Antonieta; Benavides Caveró Oscar. (2017). Riesgos del uso de detergentes domésticos en la calidad del agua en poblaciones en transición de lo rural a lo urbano: Churín 2017. Artículo de Investigación.
- IGME y EPTISA. (1985). Calidad y Contaminación de las Aguas Subterráneas en España. Parte I Aspectos Generales De La Composición, Calidad Y Contaminación De Las Aguas Subterráneas. Recuperado de: [https://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1\\_1.pdf](https://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf)
- IDEAM 2010. Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá.
- IDEAM. (2013). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua – ERA. Bogotá, D. C. 276 p.



IDEAM 2015. Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C. (2015). 496 páginas. ISBN: 978-958-8067-70-4

KEIM 2021. Pintura de Silicato. Recuperado de: <https://www.keim.com/es-es/temas-de-colores/pintura-de-silicato/>

Laboratorio de Hidrogeología de Avignon 2021. Software Diagrammes versión 6.73. Universidad de Avignon. Francia. Recuperado de: <http://www.lha.univ-avignon.fr/>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial -MAVDT- 2007. Resolución 2115 de 2007. Bogotá D.C: República de Colombia.

Ministerio de Salud 1984. Decreto 1594 de 1984. Bogotá D.C: República de Colombia.

Ministerio de salud 1998. Decreto 475 de 1998. Bogotá D.C: República de Colombia.

Organización Mundial de la Salud. 1996. Guidelines for drinking-water quality. Ginebra.

Panno, S. V., Hackley, K. C., Hwang, H. H., Greenberg, S. E., Krapac, I. G., Landsberger, S., & O'Kelly, D. J. 2006. Characterization and Identification of Na-Cl Sources in Ground Water. Ground Water.

Restrepo-Correa, I., Alvarez O., Ruiz, D., Palacio, P., Posada, M., Castaño, C., Garcés, D., Gómez, D. 2018. Actualización de Modelo Hidrogeológico Conceptual del Valle de San Nicolás. Universidad EIA. Envigado.

Restrepo A. J.J., Toussaint, J.F., González, H., Cordani, U., Kawashita, K., Linares, E. & Parica, C. 1991. Precisiones geocronológicas sobre el Occidente Colombiano. En: Simposio sobre magmatismo andino y su marco tectónico. Manizales. 1: 1-21.

Rodrigo, C., Pacheco, P., Orihuela, M., Piñeiros, M., y Cobo, E. 2018. Guía de monitoreo participativo de la calidad de agua. Quito: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

Smart Fertilizer 2020. El Cloruro en las plantas, agua y suelo. Recuperado de: <https://www.smart-fertilizer.com/es/articulos/chloride/#:~:text=Las%20fuentes%20naturales%20de%20cloruro%20en%20el%20agua,salina%20y%20puede%20contener%20alta%20concentraci%C3%B3n%20de%20cloruros>.

Universidad de Guayaquil. 2005. Caracterización De Mezclas Liquidas De Solventes Y Estudio De Investigación De Una Tecnología Para La Recuperación De Solventes. Recuperado de: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/483/1/961.pdf>

Universidad EAFIT 2020. Evaluación de la disponibilidad hídrica subterránea y definición de estrategias de abastecimiento en los valles de San Nicolás y Aburrá, Antioquia.

Walsh, F. 2018. Cómo tratar la madera con Bórax. Recuperado de: <https://www.geniolandia.com/13154440/productos-para-el-tratamiento-de-la-madera>